

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Šuler, J. 2012. Dimenzioniranje armirano-etonskih elementov iz betona visoke trdnosti. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Saje, F.): 27 str.

University  
of Ljubljana

Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Šuler, J. 2012. Dimenzioniranje armirano-etonskih elementov iz betona visoke trdnosti. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Saje, F.): 27 pp.

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ  
PRVE STOPNJE  
GRADBENIŠTVA

Kandidat:

**JURE ŠULER**

**DIMENZIONIRANJE ARMIRANOBETONSKIH  
PREREZOV IZ BETONA VISOKIH TRDNOSTI NA  
UPOGIB**

Diplomska naloga št.: 20/B-GR

**DESIGN OF HIGH-STRENGTH REINFORCED  
CONCRETE CROSS-SECTIONS EXPOSED TO  
BENDING**

Graduation thesis No.: 20/B-GR

**Mentor:**

izr. prof. dr. Franc Saje

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Član komisije:**

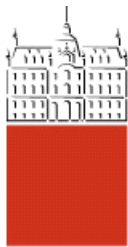
doc. dr. Tomaž Maher

viš. pred. dr. Peter Lipar

Ljubljana, 28. 09. 2012

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in*  
*geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
[fgg@fgg.uni-lj.si](mailto:fgg@fgg.uni-lj.si)

## IZJAVE

Podpisani **Jure Šuler** izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom  
**»Dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov iz betona visoke trdnosti na upogib«.**

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 4. 9. 2012

Jure Šuler

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 624.012.45(043.2)

**Avtor:** Jure Šuler

**Mentor:** izr. prof. dr. Franc Saje

**Naslov:** Dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov iz betona visoke trdnosti na upogib

**Tip dokumenta:** Dipl. nal.- UNI

**Obseg in oprema:** 27 str., 4 pregl., 12 sl., 44 en., 1 pril.

**Ključne besede:** deformacija betona, deformacija armature, mejna deformacija, napetost v betonu, napetost v armaturi, tlačna in natezna armatura, dimenzije prereza, koeficient tlačne cone, koeficient odpornosti betona, koeficient ročice rezultante napetosti betona na težišče natezne armature

### **Izvleček**

V diplomski nalogi je obravnavano področje dimenzioniranja armiranobetonskih prerezov iz betona visoke trdnosti na enojno upogibno obremenitev. Predstavljena je priprava teoretičnih podlag in ostalih potrebnih pripomočkov za dimenzioniranje na upogibno obremenitev po metodi mejnih stanj, ki jo obravnava tudi slovenski standard SIST EN 1992-1-1. Pripravljene teoretične podlage so služile kot podlaga za izdelavo programa v programskem orodju MS Excel. Izdelan program na podlagi določenih vhodnih podatkov izračuna vse potrebne količine v okviru dimenzioniranja na upogibno obremenitev. Poudarek je dan na algoritmih za točen izračun iskanih količin ob hkratnem upoštevanju vseh pogojev dimenzioniranja po metodi mejnih stanj v skladu s standardom SIST EN 1992-1-1. V primeru upoštevanja različnih pogojev, računski program vedno upošteva najstrožjega. Diplomaska naloga obsega analizo splošnega problema dimenzioniranja betonskih konstrukcij na upogibno obremenitev, izdelan program pa služi kot ustrezen pripomoček za hitrejši izračun.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 624.012.45(043.2)  
**Author:** Jure Šuler  
**Supervisor:** Assoc. Prof. Franc Saje, Ph.D.  
**Title:** Design of high-strength reinforced concrete cross-sections exposed to bending  
**Document type:** Graduation Thesis – University studies  
**Scope and tools:** 27 p., 4 tab., 12 fig., 44 eq., 1 ann.  
**Keywords:** concrete strain, reinforcement strain, maximum strain, stress in the concrete, , compressive and tensile reinforcement, cross-section dimensions, the coefficient of pressure zones, the coefficient of resistance of concrete, the resultant stress coefficient due to the center of gravity of tensile reinforcement

### **Abstract**

The Graduation Thesis deals with design of reinforced high-strength concrete cross-sections, exposed to bending load. A theoretical basis and other necessary tools for appropriate design of cross-sections due to the limit states method are being presented. Limit states method is also presented in a Slovenian standard SIST EN 1992-1-1. Theoretical tools served as the basis for the Microsoft Excel software tool development. Based on specific input data the program calculates all the necessary quantities due to the design of limit states method. Emphasis is placed on algorithms for accurate calculation. Basic quantities are taken into account, while considering all the necessary conditions of the limit states method. When there are more conditions considered in the calculation, the program always follows the stricter one. The research problem of the design of concrete structures is being analyzed in the thesis. When cross-sections of the elements are exposed only to bending load, the program developed serves as an appropriate tool for faster calculation.

## **ZAHVALA**

Iskreno se zahvaljujem mentorju prof. dr. Francu Sajetu za usmerjanje, podporo in čas, ki si ga je vzel za odgovore na vsa nerešena vprašanja pri nastajanju diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi vsem domačim in bližnjim, ki so me podpirali in še dodatno spodbujali v času nastajanja diplomske naloge.

## KAZALO VSEBINE

<b>IZJAVE.....</b>	<b>I</b>
<b>BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....</b>	<b>II</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT .....</b>	<b>III</b>
<b>ZAHVALA.....</b>	<b>IV</b>
<b>KAZALO PREGLEDNIC .....</b>	<b>VI</b>
<b>KAZALO SLIK.....</b>	<b>VII</b>
<b>1 UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1 Predmet diplomskega dela .....	2
1.2 Namen diplomskega dela .....	3
1.3 Cilji diplomskega dela .....	3
1.4 Delovne hipoteze .....	3
1.4.1 Predpostavke in poenostavitve računa upogibne mejne nosilnosti armiranobetonskih prerezov .....	3
1.5 Metode dela .....	5
1.6 Ocena dosedanjih raziskovanj s področja betonov visoke trdnosti .....	5
<b>2 PRIPRAVA TEORETIČNIH PODLAG IN PRIPOMOČKOV ZA DIMENZIONIRANJE ..</b>	<b>6</b>
2.1 Čisti enojni upogib .....	6
2.2 Izpeljava glavnih parametrov upogibne nosilnosti enojno armiranih betonskih prerezov poljubne oblike .....	7
2.3 Izrazi za določitev potrebne natezne armature enojno armiranih prerezov .....	11
2.4 Upogibno-osna nosilnost dvojno armiranih betonskih prerezov .....	13
<b>3 IZDELAVA PROGRAMA ZA DIMENZIONIRANJE ARMIRANOBETONSKIH PREREZOV.....</b>	<b>16</b>
3.1 Izračun pomožnih tabel za dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov .....	16
3.2 Izdelava rač. programa za dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov .....	19
3.2.1 Vnos podatkov .....	19
3.2.2 Izračun.....	21
3.2.2.1 Dimenzioniranje potrebne armature znanega betonskega prereza .....	21
3.2.2.2 Dimenzioniranje betonskega prereza in natezne armature .....	24
<b>4 ZAKLJUČEK.....</b>	<b>25</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>26</b>
<b>VIRI .....</b>	<b>27</b>
<b>PRILOGE.....</b>	<b>A1</b>



## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Začetni del numeričnega izračuna koeficientov $k_x$ , $k_z/k_s$ in $k_d$ .....	17
Preglednica 2: Vmesni del numeričnega izračuna pri vrednosti $\zeta=k_{x2}$ .....	17
Preglednica 3: Končni del numeričnega izračuna pri vrednosti $\zeta=k_x$ .....	17
Preglednica 4: Vrednosti koeficientov $k_x$ , $k_s$ in $k_d$ za mejne vrednosti deformacij posamezne vrste visoko trdnega betona. ....	18

## KAZALO SLIK

Slika 1: Upogibno obremenjen prerez poljubne oblike – oznake (v Lopatič, 2011: 34) .....	6
Slika 2: Upogibno obremenjen enojno armiran prerez – oznake (v Lopatič, 2011: 36) .....	7
Slika 3: Poenostavljen delovni diagram betona za dimenzioniranje (SIST EN 1992-1-1/A101:2005: 38 ) .....	8
Slika 4: Enojno armiran prerez poljubne oblike – oznake za dimenzioniranje (v Lopatič, 2011: 39) .....	11
Slika 5: Dvojno armirani prerez – oznake količin (v Lopatič, 2011: 44).....	13
Slika 6: Skica za analitičen način določitve armature dvojno armiranega prereza (Lopatič, 2011: 46) .....	14
Slika 7: Delovna diagrama armature za dimenzioniranje s pripadajočimi enačbami (SIST EN 1992-1-1/A101:2005: 43) .....	15
Slika 8: Trdnostne in deformacijske lastnosti betona normalne teže v odvisnosti od trdnostnega razreda (SIST EN 1992-1-1/A101:2005: 32 ) .....	16
Slika 9: Prikaz polj za vhodne podatke uporabnika .....	20
Slika 10: Vrste opozoril, ki jih program vrne uporabniku na podlagi vhodnih podatkov .....	22
Slika 11: Primer rezultatov izračuna potrebnega prereza armature za poljubne vhodne podatke uporabnika .....	23
Slika 12: Primer rezultatov izračuna dimenzij enojno armiranega betonskega prereza in prereza natezne armature za poljubne vhodne podatke uporabnika .....	24

## 1 UVOD

V današnjem času se uporaba betona visoke trdnosti (BVT) po svetu močno povečuje zaradi njegovih ugodnih lastnosti. To je material z dobrimi mehanskimi lastnostmi, odlikuje pa ga predvsem višja tlačna trdnost. Meja med betoni običajne trdnosti in visoko trdnimi betoni je v standardu SIST EN 206-1 v točki 3.1.10 določena pri karakteristični tlačni trdnosti 55 MPa, nad katero so betoni visoke trdnosti razdeljeni v pet trdnostnih razredov. Omenjena vrednost temelji predvsem na spreminjanju porušnih deformacij in deformacij pri najvišjih napetostih za različne tlačne trdnosti betona. Z njegovo uporabo lahko zmanjšamo količino vhodnih materialov in posledično znižamo stroške konstrukcije. BVT odlikujejo tudi druge pozitivne lastnosti, saj zaradi večje obstojnosti zagotavljajo daljšo življenjsko dobo zgrajene konstrukcije, predvsem pa njegova uporaba omogoča zmanjšanje velikosti prečnih presekov konstrukcij. (Zaletel, 2007)

V splošnem beton spada med kompozitne materiale, zato so njegove mehanske karakteristike odvisne tako od agregatnih zrn, ki ga sestavljajo, kot tudi od vrste in kvalitete cementnega kamna. Pomembno je predvsem njuno količinsko razmerje ter trdnost medsebojnih kemijskih oziroma fizikalnih vezi, ki se povečuje z zgoščanjem trdnih delcev. Način doseganja večje tlačne trdnosti betona pri visoko trdnih betonih temelji na dodatkih, ki vsestransko izboljšajo lastnosti betona, kot navaja strokovni članek Zavoda za gradbeništvo Slovenije (ZAG): *»Za izboljšanje strukture in s tem za zmanjšanje povprečne velikosti por se uporablja mikrosilika (silicijev dioksid,  $\text{SiO}_2$ ). Delci le-te so za dva velikostna razreda manjši od zrn cementa, zato zapolnijo praznine med večjimi, nepravilno oblikovanimi zrni. Visoki odmerki super plastifikatorja zmanjšujejo površinsko napetost, kar omogoča dobro zgostitev. Tako se doseže tudi manjša poraba vode, kar omogoča proizvodnjo cementnega kamna z zelo nizkim razmerjem med vodo in cementom (vodo cementno razmerje; w/c razmerje).«* (Treppo, Šelih 2000: 107,108).

Beton visoke trdnosti se v konstrukcijski praksi najpogosteje uporablja predvsem za izdelavo stebrov v spodnjih etažah, kjer so izpostavljeni velikim tlačnim napetostim. Z večanjem trdnosti betona namreč omogočamo večje razpone konstrukcije, zato je uporaba BVT smiselna predvsem v spodnjih etažah poslovnih in trgovskih objektov. Kljub visokim trdnostim betona je pomembno, koliko vzdolžne armature se nahaja v betonskem elementu, saj lahko s prevelikim odstotkom armiranja namesto plastifikacije armature povzročimo krhko porušitev betonskega prereza. V okviru svoje diplomske naloge sem se osredotočil na armiranobetonske elemente s prečnimi prerezi pravokotne oblike. S pomočjo dosedanjega znanja s področja betonskih oziroma masivnih konstrukcij sem pripravil teoretične podlage in izdelal računalniški program, ki sem ga uporabil tudi za izračun pomožnih tabel za dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov pravokotne oblike na upogibno obremenitev.

## 1.1 Predmet diplomskega dela

Zaradi vse večje splošne uporabe betonov visoke trdnosti (BVT) v praksi se kot bodoči inženirji in projektanti z njimi vse pogostejše srečujemo. V okviru svoje diplomske naloge se nisem posvečal konkretno prednostim in slabostim visoko trdnih betonov, temveč sem se osredotočil na pripravo teoretičnih podlag in pripomočkov za splošen potek dimenzioniranja armiranobetonskih (AB) prereзов iz betonov visokih trdnosti. Poglobljena študija dosedanjega znanja betonskih in masivnih konstrukcij mi je poleg osnovnega znanja programiranja predstavljala podlago za izdelavo uporabnega programa za dimenzioniranje armiranobetonskih prereзов pravokotne oblike na upogibno obremenitev, izdelanega s programskim orodjem Microsoft Excel.

Diplomsko delo v prvem delu poleg izpeljave teoretičnih izrazov za račun mejne upogibne nosilnosti armiranobetonskih prereзов obsega pripravo tabel koeficientov višine tlačene cone  $k_x$ , koeficientov izkoriščenosti upogibne nosilnosti prereза glede na tlačno nosilnost  $k_d$ , koeficienta ročice notranjih sil  $k_z$  in koeficienta natezne armature  $k_s$  pri izbranih parih deformacije betona in armature znotraj njihovih mejnih vrednosti ( $\epsilon_c \leq \epsilon_{cu2}$ ,  $\epsilon_s \leq \epsilon_{su}$ ). Zaradi različnih konstitutivnih zakonov posameznih trdnostnih razredov betonov visokih trdnosti sem moral omenjeno tabelo koeficientov pripraviti za vsak trdnostni razred betona posebej. Pri računu koeficientov sem za vsako vrsto betona robno deformacijo betona  $\epsilon_1$  od vrednosti 1‰ s korakom  $\Delta\epsilon_c = 0,25\%$  povečeval do predpisane mejne deformacije  $\epsilon_{cu2}$ . Pri tem pa sem deformacijo armature  $\epsilon_s$  od meje elastičnosti  $\epsilon_s = \epsilon_{syk}$  do mejne deformacije armature  $\epsilon_s = \epsilon_u$  povečeval s korakom  $\Delta\epsilon_s = 1\%$ . Po končanem izračunu sem ustrezne koeficiente, ki odgovarjajo mejnim vrednostim deformacij betonov glede na izbrane deformacije armature zbral v posebni tabeli. Vse izračunane tabele so prikazane v prilogi.

Drugi del diplomske naloge obsega izdelavo programa za dimenzioniranje armiranobetonskih konstrukcij iz betonov visokih trdnosti. Predhodno pripravljene teoretične podlage in tabele so predstavljale podlago za izdelavo računalniškega programa. Izdelan program na podlagi vnesenih vhodnih podatkov uporabnika (vrsta betona, širina in višina betonskega prereза, oddaljenost težišča natezne oziroma tlačne armature od roba prereза, upogibna obremenitev) najprej izračuna dejanske deformacije betona pri izbrani deformaciji armature. To se sprovede tako, da program na podlagi upogibne obremenitve prereза iz izračunanega koeficienta izkoriščenosti prereза  $k_d$ , iz pripravljenih tabel odbere vse potrebne koeficiente pri najbližji večji vrednosti koeficienta  $k_d$ . Koraki so tako majhni, da vmesna interpolacija ni potrebna. Ob dodatnem strožjem pogoju omejitve koeficienta tlačene cone na vrednost  $k_x < 0,35$  program poleg osnovne zahteve glede plastifikacije armature zagotovi še polno izkoriščenost betonskega prereза. Na podlagi novo izbranih deformacij betona in armature izračuna še potrebno količino natezne armature. Napetosti in deformacije pripadajoče tlačne armature, če je le-ta potrebna, izračuna sam. Uporabljene enačbe so

prikazane v poglavju 2. Program upošteva pogoj, da v primeru prevelikega odstotka armiranja prereza s tlačno in natezno armaturo ( $>2,5\%$ ) javi napako in od uporabnika zahteva, da poveča začetne dimenzije prereza, saj je obremenitev prevelika. Hkrati ne dopušča, da bi količina tlačne armature presegla količino natezne armature. V prvem delu program na podlagi kontrole zadostnosti znanega betonskega prereza določi potreben prerez armature, v drugem delu pa na podlagi izbranih mejnih deformacij določi dimenzije prereza in potreben prerez armature enojno armiranega prečnega prereza pravokotne oblike.

## **1.2 Namen diplomskega dela**

Pomemben del dodiplomskega študija predstavlja tudi diplomsko delo, s katerim pred pridobitvijo strokovnega naziva dokažemo ustreznost do sedaj pridobljenega inženirskega znanja. S svojo diplomsko nalogo sem obseg pridobljenega znanja v času študija še razširil, saj je izdelava programa za dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov iz betonov visoke trdnosti zahtevala poglobljeno znanje omenjenega področja betonskih konstrukcij. Na ta način sem pridobljeno teoretično znanje ter abstraktne matematične in fizikalne izpeljave povezal z dejanskim reševanjem praktičnega problema dimenzioniranja armiranobetonskih prerezov pravokotne oblike. V odvisnosti od izbranega trdnostnega razreda betona sem določil potrebne dimenzije upogibno obremenjenega betonskega prereza in potrebno količino armature.

## **1.3 Cilji diplomskega dela**

V okviru dodiplomskega študija pridobljeno teoretično in praktično znanje sem uspešno uporabil pri samostojnem razreševanju dejanskih teoretičnih in praktičnih inženirskih problemov. V okviru svoje diplomske naloge sem nekatere dodatne informacije iz poleg do sedaj poznanih virov pridobil iz strokovnih znanstvenih člankov in jih pri reševanju konkretnega problema dimenzioniranja tudi uspešno uporabil. Diplomsko delo kot inženirski izdelek predstavlja pripravo na morebitno pisanje različnih raziskovalnih poročil in strokovnih člankov tako v času nadaljevanja študija, kakor tudi kasneje v praksi.

## **1.4 Delovne hipoteze**

### **1.4.1 Predpostavke in poenostavitve računa upogibne mejne nosilnosti armiranobetonskih prerezov**

Pri določanju upogibne mejne nosilnosti armiranobetonskih prečnih prerezov upoštevamo splošno uveljavljene predpostavke in poenostavitve, ki so povzete tudi v standardu SIST EN 1992-1-1 in sicer:

- Velja Bernoulli-Navier-ova hipoteza o ravninskih prerezih: prerezi, ki so bili ravni pred obremenitvijo, ostanejo ravni tudi po obremenitvi.
- Deformacija armature v tlačni in natezni coni je enaka deformaciji v okoliškem betonu. Predpostavljena je popolna sprijemnost med palicami armature in okoliškim betonom. Ta stik ostane intakten vse do porušitve prereza.

$$\varepsilon_s(y, z) = \varepsilon_c(y, z) = \varepsilon(y, z) \quad (1)$$

- Natezno nosilnost betona v računu upogibne nosilnosti armiranobetonskega prereza zanemarimo. Ker natezne nosilnosti betona ne upoštevamo, oblika natezne cone pod nevtralno osjo ne vpliva na nosilnost prereza.
- Napetosti v tlačnem betonu so določene na podlagi poenostavljenega delovnega diagrama betona za dimenzioniranje. Kot osnovni poenostavljeni diagram betona za dimenzioniranje prerezov je mišljen diagram, ki je kombinacija parabole in premice. Za vse vrste osno-upogibne obremenitve lahko ob upoštevanju ustreznih korekcijskih koeficientov privzamemo tudi poenostavljeni bilinearni delovni diagram, za primer velike ekscentričnosti (nevtralna os v prerezu) pa tudi najenostavnejši diagram v obliki pravokotnika.
- Napetosti v armaturi so določene na podlagi računskega delovnega diagrama jekla za dimenzioniranje prerezov. Pri tem lahko uporabimo ali enostavnejši diagram jekla brez utrditve, pri katerem mejna deformacija  $\varepsilon_{ud}$  ni omejena, lahko pa upoštevamo tudi delovni diagram jekla z utrditvijo, to je z nagnjeno zgornjo vejo diagrama. Upoštevanje tega diagrama prinese v običajnih razmerah le zanemarljivo zmanjšanje potrebne količine armature in ni prav pogosto v vsakdanji inženirski praksi.
- Mejna osno-upogibna nosilnost armiranega betonskega prereza je določena z mejno deformacijsko ravnino ( $D_u$ ). To je deformacijska ravnina, pri kateri je vsaj v eni ali več točkah betona oziroma armature dosežena konvencionalna mejna deformacija  $\varepsilon_{cu2}$  (ali  $\varepsilon_{cu3}$ ) oziroma  $\varepsilon_{ud}$ .

Vsaki mejni deformacijski ravnini  $D_u$ , enolično pripada en sam vektor mejne nosilnosti znanega prereza  $\{R_d\}$ . Če pri tem s spreminjanjem mejnih deformacijskih ravnin po korakih pokrijemo celotno deformacijsko območje mejnih deformacijskih ravnin in za vsako izbrano lego mejne deformacijske ravnine določimo pripadajoči vektor osno-upogibne mejne nosilnosti prereza, dobimo vse možne vektorje mejne nosilnosti znanega armiranobetonskega prereza. Na ta način so pripravljeni vsi razpoložljivi pripomočki za praktično dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov na osno-upogibno obremenitev v brezdimenzionalni obliki.

## 1.5 Metode dela

V prvem delu diplomskega dela sem se pri pripravi tabel že prej omenjenih koeficientov za hitro dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov odločil za numeričen način reševanja problema. Vsi potrebni izrazi za izračun teoretičnih podlag in ostalih pripomočkov, ki so podani v poglavju 2, so v večini primerov zapisani v integralni obliki. Pri svojem delu sem se odločil za numerično integracijo napetosti po slojih. Pri tem sem moral paziti, da višina posameznih slojev za ustrezno natančnost končnih rezultatov ni bila prevelika. Za brezdimenzionalno debelino slojev sem izbral  $\Delta\eta=0,0001$  in že tekom izračuna ugotovil, da je izbrana debelina slojev ustrezna. Dobljene rezultate sem za kontrolo primerjal še z vrednostmi v Priročniku za dimenzioniranje po Evrokod standardih in ugotovil, da sem pravilno izpeljal izračun.

V okviru drugega dela diplomskega dela sem imel opravka z manj kompleksnimi problemi. Izdelava računalniškega programa je temeljila predvsem na podrobnem poznavanju in razumevanju snovi ter dobrem poznavanju programskega orodja Microsoft Excel. Kot že omenjeno sem s pomočjo raznih funkcij, ki jih omogoča Excel, izvedel dokončen izračun vseh predvidenih količin v okviru dimenzioniranja armiranobetonskih prerezov iz betona visokih trdnosti na upogibno obremenitev. Na podlagi izbranih dimenzij prereza, oddaljenosti težišča armatur od robov prereza, vrste betona ter velikosti izbrane upogibne obremenitve sem preveril ustreznost oziroma neustreznost začetnih izbranih dimenzij armiranobetonskega prereza ter izpisal pripadajoč vzrok.

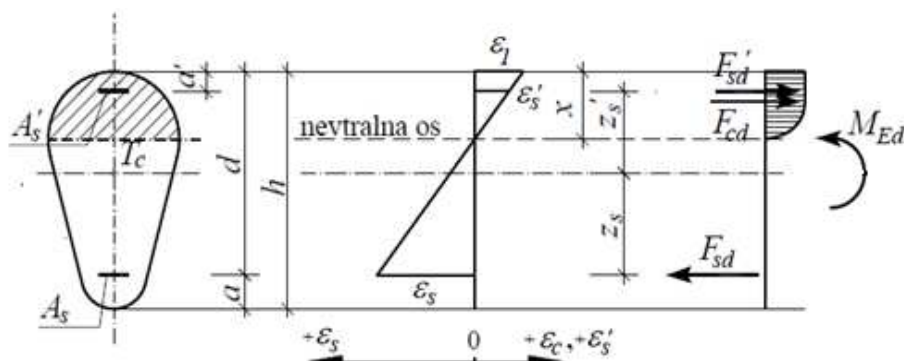
## 1.6 Ocena dosedanjih raziskovanj s področja betonov visoke trdnosti

Kot pri običajnih betonih se tlačna trdnost betona visoke trdnosti določa na standardiziranih preizkušanjih v obliki valja in kocke določenih dimenzij. Ugotovljeno je bilo, da izdelava betonov visoke trdnosti zaradi kompleksnejše sestave mešanice zahteva podrobnejše ugotavljanje in preučevanje kvalitete lastnosti. Prednosti betonov visokih trdnosti ter postopek priprave so že omenjeni v poglavju 1. Na podlagi teoretičnih in praktičnih spoznanj so raziskovalci ugotovili, da lahko z zmanjševanjem velikosti maksimalnega zrna agregata ter zmanjševanjem vrednosti vodo-cementnega razmerja dosežemo zelo veliko tlačno trdnost. Primerno optimalno vodovezivno razmerje sveže mešanice se navadno določa v laboratorijih, sama priprava, transport in vgrajevanje pa se lahko močno razlikujejo od postopkov za običajne betone. (NRMCA, 2000) Vsekakor pa so karakteristike betonov visoke trdnosti poleg poznanih lastnosti še vedno v fazi raziskovanja. Večja tlačna trdnost betona pomembno vpliva na zmanjšanje minimalnih potrebnih dimenzij betonskega prereza, kar sem skušal preučiti tudi z izdelavo omenjenega programa za dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov pravokotne oblike na upogibno.

## 2 PRIPRAVA TEORETIČNIH PODLAG IN PRIPOMOČKOV ZA DIMENZIONIRANJE

### 2.1 Čisti enojni upogib

Med>0; Ned=0



Slika 1: Upogibno obremenjen prerez poljubne oblike – oznake (v Lopatič, 2011: 34)

Slika 1 prikazuje dvojno armiran prerez poljubne oblike, ki je izpostavljen čistemu upogibu. Na spodnji strani prereza, ki je natezno obremenjena, je nameščena spodnja oziroma natezna armatura  $A_s$ , na območju tlačnih napetosti pa zgornja tlačna armatura  $A_s'$ . V primeru, da imamo v prerezu samo natezno armaturo ( $A_s > 0$ ,  $A_s' = 0$ ), ga imenujemo enojno armiran prerez. Zaradi upogibne obremenitve in nične osne sile nevtralna os deformacij pade v območje med zgornjim tlačnim robom prereza in spodnjo natezno armaturo, kar velja tudi v primeru velike ekscentričnosti osne sile. Razdalja  $x$  predstavlja višino tlačene cone betona in nam pove oddaljenost nevtralne osi od tlačnega roba prereza. Razdalja  $h$  predstavlja celotno višino prereza, statična višina  $d$  pa oddaljenost natezne armature od tlačnega roba prereza. Kot je razvidno iz *Slike 1*, so za lažjo izvedbo nadaljnje izpeljave s pozitivnimi vrednostmi upoštevane deformacije in napetosti tako betona kot tudi armature, s tem, da moramo smeri delovanja rezultirajočih sil v betonu ( $F_{cd}$ ), v natezni armaturi ( $F_{sd}$ ) in v tlačni armaturi ( $F_{sd'}$ ) upoštevati v skladu s sliko 1.

Višino tlačene cone navadno zapišemo z uporabo koeficienta višine tlačene cone  $k_x$ , ki ga na podlagi podobnosti trikotnikov izrazimo z deformacijo betona na zgornjem robu  $\varepsilon_1$ , deformacijo natezne armature  $\varepsilon_s$  in statično višino prereza  $d$ :

$$\frac{\varepsilon_1}{x} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_s}{d} \quad \rightarrow \quad x = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_s} * d \quad \rightarrow \quad \boxed{x = k_x * d} \quad \rightarrow \quad \boxed{k_x = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_s}} \quad (2)$$

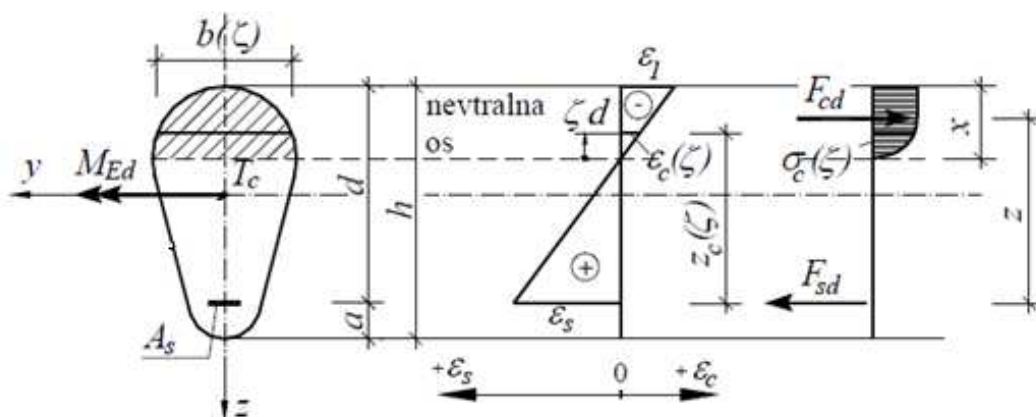


Koeficient višine tlačne cone je eden izmed pokazateljev duktilnosti prerezov, pri katerih se natezna armatura plastificira pred izčrpanjem nosilnosti tlačne cone betona. Krhkim porušitvam armiranobetonskih elementov, pri katerih je nosilnost tlačne cone betona izkoriščena pred plastifikacijo armature, se je treba izogniti, če je to le mogoče. Pogoji plastifikacije armature ( $\varepsilon_s = \varepsilon_{yd}$ ) ob hkratni polni izkoriščenosti betona ( $\varepsilon_1 = \varepsilon_{cu2}$ ) omejuje vrednost koeficienta višine tlačne cone navzgor:

$$k_x \leq \frac{1}{1 + \varepsilon_{yd} / \varepsilon_{cu2}} \quad (3)$$

Standard SIST EN 1992-1-1 omejitev višine tlačne cone navzgor eksplicitno navaja le v poglavju analize betonskih konstrukcij v zvezi s prerazporeditvijo oziroma adaptacijo upogibne obremenitve elementov konstrukcije. Vseeno pa je pri upogibno obremenjenih elementih priporočljivo, da se z dodatno omejitvijo vrednosti koeficienta tlačne cone  $k_x$  izogibamo pretirano visokim stopnjam armiranja prereza z natežno armaturo. Pri betonih visoke trdnosti je priporočljiva vrednost koeficienta  $k_x < 0,35$ . Pri izdelavi programa sem upošteval priporočila standarda ter z upoštevanjem dodatne omejitve koeficienta tlačne cone  $k_x < 0,35$  s pomočjo enačbe (3) posledično omejil deformacijo natezne armature navzdol.

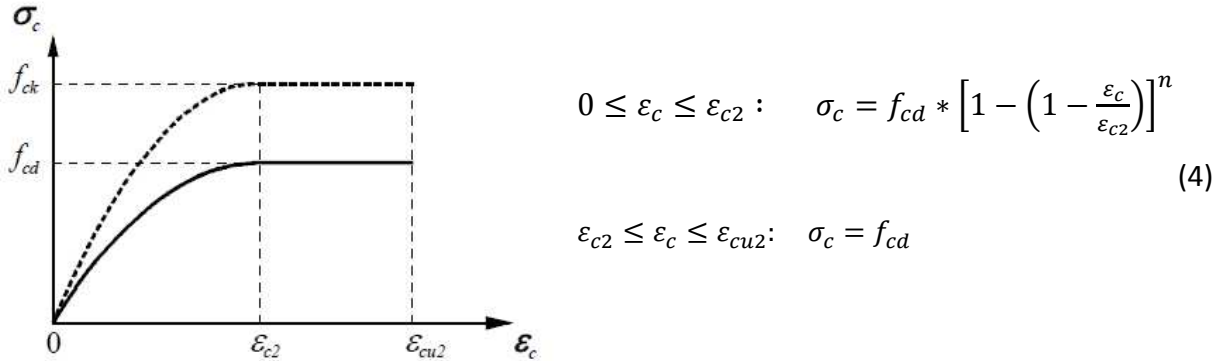
## 2.2 Izpeljava glavnih parametrov upogibne nosilnosti enojno armiranih betonskih prerezov poljubne oblike



Slika 2: Upogibno obremenjen enojno armiran prerez – oznake (v Lopatič, 2011: 36)

Pri izpeljavi osnovnih parametrov mejne nosilnosti armiranobetonskih prerezov poljubne oblike iz praktičnih razlogov vpeljemo brez-dimenzionalno koordinato  $\zeta$ , ki izhaja od nevtralne osi in je usmerjena proti tlačnemu robu prereza. Z brezdimenzijsko koordinato  $\zeta$  potem izrazimo širino prereza na poljubnem mestu tlačne cone, s pomočjo konstitutivnega zakona betona pa še napetost betona na poljubnem mestu tlačne cone.

V okviru nadaljnjega izpeljevanja upoštevamo poenostavljen delovni diagram betona za dimenzioniranje prereзов po izrazih iz standarda (slika 3). Tudi mejne vrednosti deformacij in ostale potrebne količine so podani v standardu.



Slika 3: Poenostavljen delovni diagram betona za dimenzioniranje (SIST EN 1992-1-1/A101:2005: 38 )

Deformacija na poljubnem mestu prereza:

$$\frac{\varepsilon_1}{x} = \frac{\varepsilon_c(\zeta)}{\zeta * d} \rightarrow \varepsilon_c(\zeta) = \frac{\varepsilon_1 * \zeta}{1} * \frac{d}{x} = \frac{\varepsilon_1 * \zeta}{k_x} \quad ; \quad 0 \leq \zeta \leq \frac{\varepsilon_1 * \zeta}{1} \quad (5)$$

Vrednost  $\zeta$  pri mejni deformaciji  $\varepsilon_{c2}$ :

$$\varepsilon_c(\zeta) = \varepsilon_{c2} = \frac{\varepsilon_1 * \zeta}{k_x} \rightarrow \zeta = \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_1} * k_x = k_{x2} \quad (6)$$

Upoštevanje izrazov (4) in (6):

$$0 \leq \zeta \leq k_{x2} : \sigma_c(\zeta) = f_{cd} * \left[ 1 - \left( \frac{\varepsilon_1 * \zeta}{\varepsilon_{c2} * k_x} \right) \right]^n \rightarrow \overline{\sigma}_c(\zeta) = \frac{\sigma_c(\zeta)}{f_{cd}} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right) \right]^n \quad (7)$$

$$k_{x2} \leq \zeta \leq k_x : \sigma_c(\zeta) = f_{cd} \rightarrow \overline{\sigma}_c(\zeta) = 1 \quad (8)$$

Napetosti betona zapišemo s pomočjo normiranih vrednosti iz izrazov (7) in (8):

$$\sigma_c(\zeta) = \overline{\sigma}_c(\zeta) * f_{cd} \quad (9)$$

Poljubne oblike prereзов upoštevamo z uvedbo oblikovne funkcije  $\beta(\zeta)$ , ki je v primeru pravokotne oblike prečnega prereza kar enaka 1, saj je primerjalna širina  $\bar{b}$  enaka širini prereza  $b(\zeta)$  po celi višini tlačne cone, po kateri integriramo napetosti betona:

$$\beta(\zeta) = \frac{b(\zeta)}{\bar{b}} = 1 \rightarrow b(\zeta) = \beta(\zeta) * \bar{b} = \bar{b} \quad (10)$$

Z upoštevanjem ustrezne oblikovne funkcije  $\beta(\zeta)$  v nadaljnjih izrazih za določitev upogibne nosilnosti enojno simetričnih armiranobetonskih prereзов le-ti veljajo za vse oblike prereзов,

le oblikovno funkcijo  $\beta(\zeta)$  je potrebno ustrezno definirati in temu prilagoditi integracijska območja. V primeru pravokotnega prečnega prereza, ki je predmet moje diplomske naloge, je oblikovna funkcija  $\beta(\zeta)=1$ .

V nadaljevanju izpeljave lahko rezultanto tlačnih napetosti betona  $F_{cd}$  in statični moment napetosti betona  $M_{cd,s}$  glede na težišče natezne armature zapišemo:

$$F_{cd} = \int_{A_c} \sigma_c(\zeta) * dA \quad (11)$$

$$M_{cd,s} = \int_{A_c} \sigma_c(\zeta) * z_c(\zeta) * dA \quad (12)$$

$$dA = b(\zeta) * d * d\zeta = \bar{b} * d * d\zeta \quad (13)$$

$$\text{iz skice: } z_c = d - x + \zeta * d = \left(1 - \frac{x}{d} + \zeta\right) * d \quad (14)$$

Z vstavitvijo izrazov (9), (10), (13) in (14) v enačbo (12) dobimo:

$$M_{cd,s} = \int_0^{k_x} f_{cd} * \bar{\sigma}_c(\zeta) * (1 - k_x + \zeta) * d * \bar{b} * d * d\zeta = f_{cd} * \bar{b} * d^2 * \int_0^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) * (1 - k_x + \zeta) * d\zeta \quad (15)$$

Izraz pod integralom v enačbi (15) predstavlja brez-dimenzionalni koeficient izkoriščenosti tlačne cone armiranobetonskega prereza in ga označimo s  $k_d$ :

$$M_{cd,s} = f_{cd} * \bar{b} * d^2 * k_d \quad (16)$$

$$k_d = \int_0^{k_x} \bar{\sigma}_c(\zeta) * (1 - k_x + \zeta) * d\zeta \quad (17)$$

Za končno obliko izraza za koeficient  $k_d$  je potrebno upoštevati še ustrezna integracijska področja, v katerih je potek napetosti betona definiran s po eno samo funkcijo (glej enačbe 7 in 8).

$$k_d = \int_0^{k_{x2}} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}}\right)\right]^n * (1 - k_x + \zeta) * d\zeta + \int_{k_{x2}}^{k_x} (1 - k_x + \zeta) * d\zeta \quad (18)$$

Ročico notranjih sil  $z$  in posledično pripadajoč koeficient ročice notranjih sil  $k_z$  lahko določimo iz momentnega pogoja rezultante tlačnih napetosti betona  $F_{cd}$  glede na težišče natezne armature (glej sliko 2):

$$M_{cd,s} = F_{cd} * z \rightarrow z = \frac{M_{cd,s}}{F_{cd}} \quad (19)$$

Podobno kot pri statičnem momentu tudi pri izračunu rezultante tlačnih napetosti betona upoštevam izraze (9), (10), (13) in (14), ki jih vstavim v izraz (11) in dobim:

$$F_{cd} = \int_0^{k_x} f_{cd} * \overline{\sigma_c}(\zeta) * \bar{b} * d * d\zeta = f_{cd} * \bar{b} * d * \int_0^{k_x} \overline{\sigma_c}(\zeta) * d\zeta \quad (20)$$

Integracijski območji sta definirani z enačbama (7) in (8), ki ju upoštevam v enačbi (20) in dobim:

$$F_{cd} = f_{cd} * \bar{b} * d * \left( \int_0^{k_{x2}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_1 * \zeta}{\varepsilon_{c2} * k_x} \right) \right]^n * d\zeta + \int_{k_{x2}}^{k_x} d\zeta \right) \quad (21)$$

Če izraza (15) in (20) uporabimo v enačbi (19), dobimo končni izraz za določitev ročice notranjih sil  $z$  (22).

$$\begin{aligned} z = \frac{M_{cd,s}}{F_{cd}} &= \frac{(f_{cd} * \bar{b} * d^2 * \int_0^{k_x} \sigma_c(\zeta) * (1 - k_x + \zeta) * d\zeta)}{(f_{cd} * \bar{b} * d * \int_0^{k_x} \overline{\sigma_c}(\zeta) * d\zeta)} = \\ &= \left( \frac{\int_0^{k_x} \sigma_c(\zeta) * (1 - k_x + \zeta) * d\zeta}{\int_0^{k_x} \overline{\sigma_c}(\zeta) * d\zeta} \right) * d = k_z * d \end{aligned} \quad (22)$$

Koeficient ročice notranjih sil je določen z izrazom v oklepaju v enačbi (22). Če upoštevamo enačbo (17), dobimo zvezo med koeficientom upogibne nosilnosti prereza  $k_d$  in koeficientom ročice rezultante napetosti betona:

$$k_z = k_d / \int_0^{k_x} \overline{\sigma_c}(\zeta) * d\zeta \quad (23)$$

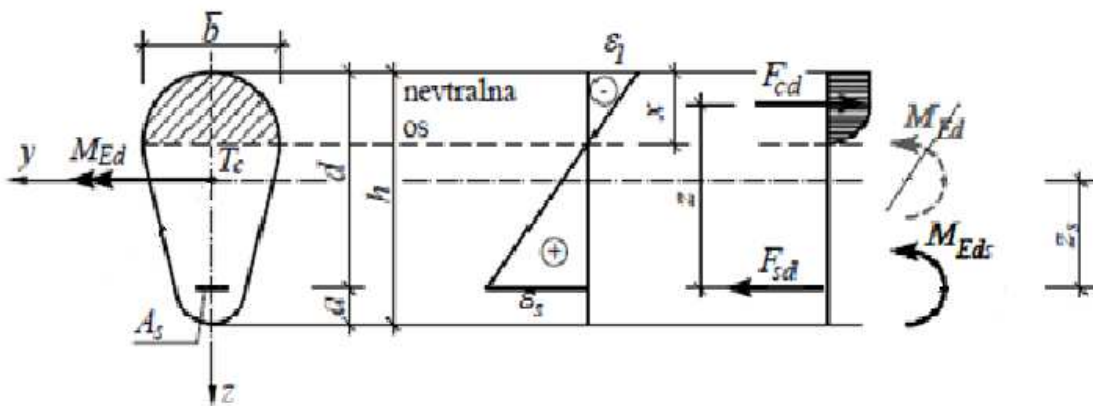
Z upoštevanjem ustreznih integracijskih območij in normiranih napetosti betona (enačbi 6 in 7) dobimo še končni izraz za vrednost koeficienta ročice notranjih sil  $k_z$ :

$$k_z = \frac{\int_0^{k_{x2}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right) \right]^n * (1 - k_x + \zeta) * d\zeta + \int_{k_{x2}}^{k_x} (1 - k_x + \zeta) * d\zeta}{\left( \int_0^{k_{x2}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_1 * \zeta}{\varepsilon_{c2} * k_x} \right) \right]^n * d\zeta + \int_{k_{x2}}^{k_x} d\zeta \right)} \quad (24)$$

$$\boxed{k_s = 1/k_z} \quad (25)$$

Tako izpeljani izrazi v enačbah od (1) do (25) predstavljajo teoretično podlago za izdelavo praktičnih pripomočkov za dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov pravokotne oblike na upogibno obremenitev. Na podlagi izbranih kombinacij deformacij betona in armature ( $\varepsilon_1/\varepsilon_s$ ) sem opisal različne mejne lege deformacijske ravnine in izračunal pripadajoče koeficiente  $k_x$ ,  $k_d$ ,  $k_z$ ,  $k_s$ , pri tem koeficient natezne armature  $k_s$  predstavlja recipročno vrednost koeficienta ročice notranjih sil  $k_z$  ( $k_s = 1/k_z$ ). Deformacije betona  $\varepsilon_1$  sem povečeval od začetne vrednosti 1‰ do končne mejne deformacije  $\varepsilon_{cu2}$  ter izračunal vrednosti omenjenih koeficientov za dimenzioniranje skupaj z devetimi kombinacijami deformacij armature. Zaradi različnih vrednosti mejnih deformacij in eksponenta  $n$  v enačbi (4) sem moral pripomočke v obliki tabel pripraviti za vsak trdnostni razred betona posebej.

### 2.3 Izrazi za določitev potrebne natezne armature enojno armiranih prerezov



Slika 4: Enojno armiran prerez poljubne oblike – oznake za dimenzioniranje (v Lopatič, 2011: 39)

Iz slike 4 najprej zapišemo momentni ravnotežni pogoj na težišče natezne armature, nato pa v dobljeni enačbi upoštevamo še izraza (16) in (19):

$$F_{cd} * z - M_{Eds} = 0 \quad \rightarrow \quad M_{Eds} = F_{cd} * z \quad (26)$$

$$f_{cd} * \bar{b} * d^2 * k_d = F_{cd} * \frac{M_{cd,s}}{F_{cd}} = M_{cd,s} \quad \rightarrow \quad \boxed{k_d = \frac{M_{cd,s}}{f_{cd} * \bar{b} * d^2}} \quad (27)$$

Za določitev sile v armaturi najprej zapišemo ravnotežni pogoj vseh sil v prerezu in v dobljeni enačbi upoštevamo enačbi (25) in (26):

$$F_{cd} - F_{sd} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{M_{cd,s}}{z} - F_{sd} = 0 \quad \rightarrow \quad F_{sd} = \frac{M_{cd,s}}{z} = \frac{M_{cd,s}}{k_z * d} = k_s * \frac{M_{cd,s}}{d} \quad (28)$$

Če želimo določiti potrebni prerez natezne armature, moramo enačbo za velikost sile v armaturi (28) deliti s pripadajočo napetostjo natezne armature:

$$A_s = \frac{F_{sd}}{\sigma_s(\varepsilon_s)} = k_s * \frac{M_{cd,s}}{d * \sigma_s(\varepsilon_s)} \quad (29)$$

Ker pri projektiranju oziroma dimenzioniranju težimo k čim večjemu izkoristku uporabljenih materialov, moramo vedno zagotavljati vsaj osnovno duktilnost izbranega prereza s pogojem plastifikacije armature. Pri upoštevanju poenostavljenega delovnega diagrama jekla brez utrditve to pomeni:

$$\varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd} \rightarrow \sigma_s(\varepsilon_s) = f_{yd} \quad (30)$$

Z upoštevanjem pogoja (30) v enačbi (29) dobimo končni izraz za potrebno količino natezne armature enojno armiranega prereza:

$$\boxed{A_s = \frac{F_{sd}}{f_{yd}} = k_s * \frac{M_{cd,s}}{d * f_{yd}}} \quad (31)$$

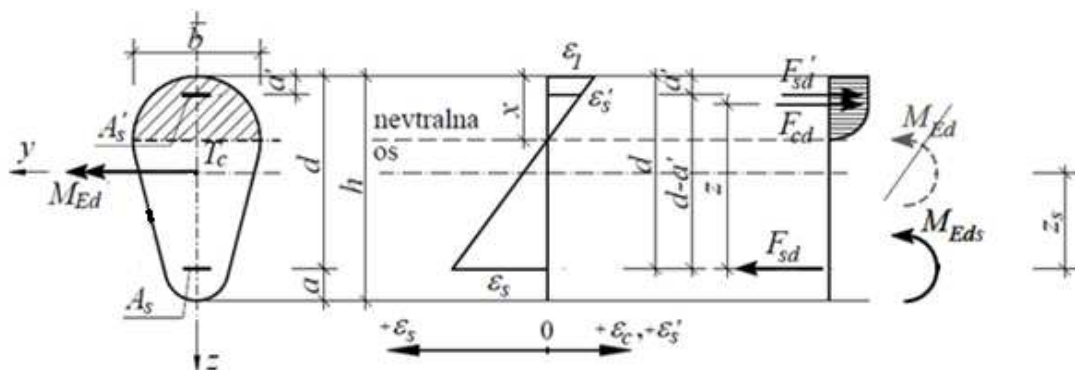
Pri praktičnem delu lahko v preglednicah s koeficienti za dimenzioniranje pri izračunanem koeficientu  $k_d$  in izbrani deformaciji jekla  $\varepsilon_s$  odberemo ustrezno robno deformacijo betona  $\varepsilon_1$  ter pripadajoča koeficienta  $k_x$  in  $k_s$ . S poznanim koeficientom  $k_s$  s pomočjo izraza (31) določimo potrebno natezno armaturo  $A_s$ , koeficient  $k_x$  pa nam služi za oceno stopnje duktilnosti prereza in možnosti prerazporeditve obremenitve elementa konstrukcije.

$$\boxed{k_x \leq k_{x,max}} \quad (32)$$

V primeru, da je pri podani upogibni obremenitvi koeficient izkoriščenosti armiranobetonskega prereza  $k_d$  večji od njegove vrednosti pri mejni deformaciji betona ( $\varepsilon_1 = \varepsilon_{cu2}$ ) in pri izbrani deformaciji armature  $\varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}$ , izbrani betonski prerez ne zadošča za prevzem podane upogibne obremenitve.

V tem primeru imamo na razpolago več možnih rešitev. Če je mogoče, je najboljšje povečati dimenzije betonskega prereza. Pri tem je povečanje višine prereza bolj učinkovito kot povečanje širine prereza. Drugo možnost predstavlja namestitev tlačne armature, ki ustrezno poveča nosilnost tlačne cone armiranobetonskega prereza. Tretja možnost pa predstavlja zmanjšanje deformacije natezne armature  $\varepsilon_s$ , ki povzroči povečanje višine tlačne cone  $x$  in s tem zmanjšanje tlačne napetosti betona ter ustrezno zmanjšanje ročice notranjih sil  $z$  ter pripadajoče povečanje natezne armature  $A_s$ . Upošteva se lahko tudi kombinacija predhodno navedenih ukrepov. Pri izdelavi računalniškega programa za dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov je upoštevana tudi možnost namestitve tlačne armature oziroma dvojnega armiranja prerezov.

## 2.4 Upogibno-osna nosilnost dvojno armiranih betonskih prerezov



Slika 5: Dvojno armirani prerez – oznake količin (v Lopatič, 2011: 44)

Pri upogibno-osni obremenitvi armiranobetonskega prereza obremenitev prereza prestavimo v težišče natezne armature. Značilnost dvojno armiranega prereza je ta, da se v njegovi tlačeni coni poleg rezultante napetosti v betonu  $F_{cd}$ , pojavi še rezultanta napetosti v tlačni armaturi  $F_{sd}'$ . Na podlagi podanih oznak na sliki 5 lahko zapišemo momentni ravnotežni pogoj glede na težišče natezne armature (33) ter projekcijski ravnotežni pogoj vseh sil v prerezu (35). Ker poleg velikosti upogibnega momenta v prerezu ( $M_{Eds}$ ) pri polni izkoriščenosti betona poznamo tudi rezultanto tlačnih napetosti betona  $F_{cd}$ , lahko iz enačb (33) in (35) določimo iskani sili v spodnji natezni armaturi ( $F_{sd}$ ) in zgornji tlačni armaturi ( $F_{sd}'$ ). Pri tem vrednost  $a'$  izrazimo z razmerjem  $\delta$  po enačbi (34).

$$F_{cd} * z + F_{sd} * (d - a') - M_{Eds} = 0 \quad \rightarrow \quad F_{sd} = \frac{M_{Eds} - F_{cd} * z}{(d - a')} = \frac{M_{Eds} - F_{cd} * [z]}{d * (1 - \delta)} \quad (33)$$

$$\delta = \frac{a'}{d} \quad (34)$$

$$F_{cd} + F_{sd}' - F_{sd} = 0 \quad \rightarrow \quad F_{sd}' = F_{sd} - F_{cd} \quad (35)$$

V nadaljnji izpeljavi postopamo popolnoma enako kot prej, le da vse izračunane vrednosti, ki se nanašajo na enojno armiran prerez pri izbranih deformacijah betona in natezne armature ( $\epsilon_1/\epsilon_s$ ), zapišemo v oglatih oklepajih. Tako izračunano vrednost koeficienta  $k_d$ , ki se nanaša na enojno armiran prerez označimo s  $[k_d]$  in to upoštevamo v enačbi (27):

$$[M_{Eds}] = f_{cd} * \bar{b} * d^2 * [k_d] \quad ; \quad [M_{Eds}] = [F_{cd}] * [z] \quad (36)$$

Pri tem je  $[M_{Eds}]$  tisti del upogibnega momenta, ki ga lahko prerez pri znanih deformacijah ( $\epsilon_1/\epsilon_s$ ) prevzame glede na nosilnost tlačne cone betona.

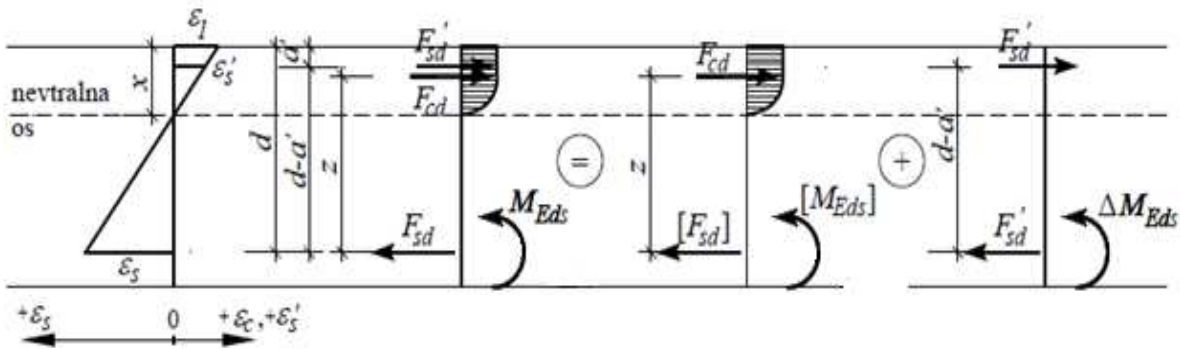
Z upoštevanjem izrazov (36) v enačbi (33) lahko določim končno enačbo za potrebno silo v tlačni armaturi, pri čemer dobljeni  $\Delta M_{Eds}$  predstavlja neuravnoteženi del momenta v prerezu, ki ga mora prevzeti tlačna armatura skupaj z dodatno natezno armaturo:

$$F'_{sd} = \frac{M_{Eds} - [M_{Eds}]}{d * (1 - \delta)} = \frac{\Delta M_{Eds}}{d * (1 - \delta)} \quad (37)$$

$$\Delta M_{Eds} = M_{Eds} - [M_{Eds}] = M_{Eds} - f_{cd} * \bar{b} * d^2 * [k_d] \quad (38)$$

Če v izrazu (35) upoštevamo izraz (36) in ga ustrezno preuredimo, dobimo izraz za celotno silo v natezni armaturi  $F_{sd}$  (39).

$$F_{sd} = [F_{cd}] + F'_{sd} = \frac{[M_{Eds}]}{z} + F'_{sd} = [k_s] * \frac{[M_{Eds}]}{d} + F'_{sd} \quad (39)$$



Slika 6: Skica za analitičen način določitve armature dvojno armiranega prereza (v Lopatič, 2011: 46)

Za določitev potrebne količine tlačne armature moramo v izrazu (37) upoštevati pripadajočo napetost tlačne armature  $\sigma'_s$ . Podobno naredimo v izrazu (39), pri čemer pa moramo upoštevati pripadajočo napetost natezne armature. Prereza potrebne natezne in tlačne armature  $A_s$  in  $A'_s$  sta določena z izrazoma (40) in (41).

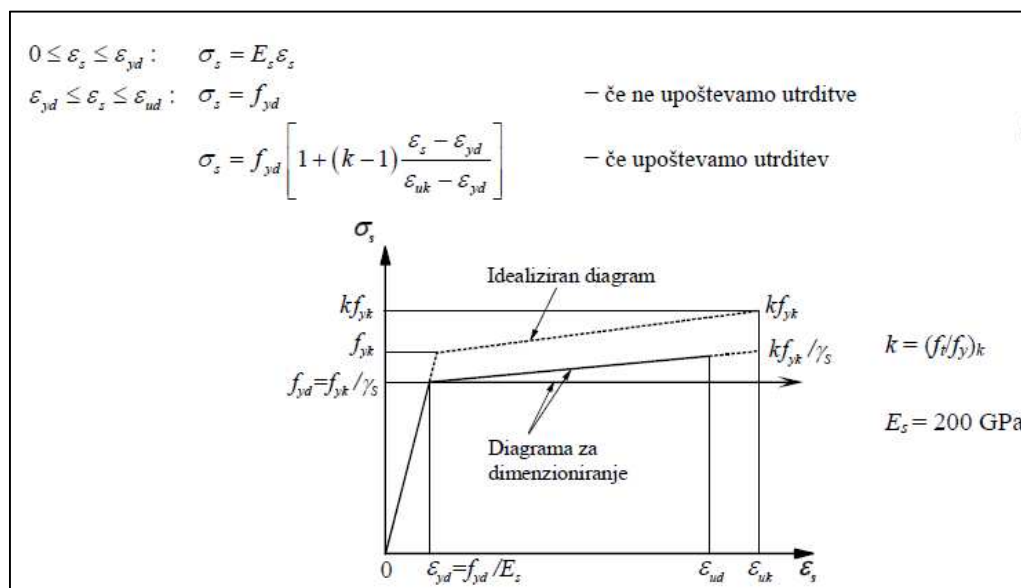
$$A'_s = \frac{F'_{sd}}{\sigma'_s} = \frac{\Delta M_{Eds}}{\sigma'_s * d * (1 - \delta)} \quad (40)$$

$$A_s = \frac{F_{sd}}{\sigma_s} = [k_s] * \frac{[M_{Eds}]}{\sigma_s * d} + \frac{\Delta M_{Eds}}{\sigma_s * d * (1 - \delta)} = [A_s] + \Delta A_s \quad (41)$$

$[A_s]$  predstavlja količino natezne armature iz enačbe (29), glede na enojno armiran prerez,  $\Delta A_s$  pa količino dodatne natezne armature, ki je potrebna za prevzem diferenčnega upogibnega momenta  $\Delta M_{Eds}$ , ki ga enojno armiran prerez sam ne more prevzeti. Diferenčni upogibni moment  $\Delta M_{Eds}$  prevzame dvojica sil v tlačni armaturi  $F'_s$  in dodatna sila v natezni armaturi  $\Delta F_s$  ( $\Delta F_s = F'_s$ ).



Pripadajoče napetosti v tlačni in natezni armaturi iz izrazov (40) in (41) določimo na podlagi konstitutivnega zakona jekla za dimenzioniranje, ki jih podaja standard SIST EN 1992-1-1. Prikazani so na sliki 7.



Slika 7: Delovna diagrama armature za dimenzioniranje s pripadajočimi enačbami  
(SIST EN 1992-1-1/A101:2005: 43)

Pri tem moramo upoštevati ustrezne pripadajoče tlačne in natezne deformacije armature. Deformacijo na mestu natezne armature izberemo. Tlačno deformacijo armature  $\varepsilon'_s$  pa določimo na podlagi lastnosti podobnih trikotnikov linearnega poteka deformacij po višini prereza (slika 5). Po ureditvi in dodatnem upoštevanju zvez (2) in (34) dobimo končni izraz za deformacijo na mestu tlačne armature:

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_1 * \left( 1 - \delta / [k_x] \right) \quad (42)$$

Ob pogoju plastifikacije natezne armature lahko ponovno upoštevamo izraz (29). V odvisnosti od vrednosti tlačne deformacije iz enačbe (42) lahko določimo pripadajočo napetost na mestu tlačne armature z upoštevanjem delovnega diagrama jekla brez utrditve iz slike 7.

$$0 \leq \varepsilon'_s \leq \varepsilon_{yd} : \sigma'_s(\varepsilon'_s) = E_s * \varepsilon'_s \quad ; \quad E_s = 20000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \quad (43)$$

$$\varepsilon'_s \geq \varepsilon_{yd} : \sigma'_s(\varepsilon'_s) = f_{yd} \quad (44)$$

S pomočjo podanih izrazov izračunamo količino potrebne natezne in tlačne armature, pri čemer upoštevamo še korekcijo napetosti zaradi upoštevanja napetosti betona na mestu, kjer se dejansko nahaja tlačna armatura.

### 3 IZDELAVA PROGRAMA ZA DIMENZIONIRANJE ARMIRANOBETONSKIH PREREZOV

#### 3.1 Izračun pomožnih tabel za dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov

V okviru prvega dela svoje diplomske naloge sem na podlagi izpeljanih teoretičnih podlag, ki so opisane v poglavju 2, pripravil praktične pripomočke za dimenzioniranje AB prerezov iz betonov visoke trdnosti v obliki tabel. Najprej sem na podlagi izbrane vrste betona v tabeli v programskem orodju Excel zbral vse podatke o njegovih karakteristikah ter poteku mejnih deformacij. Podatke za posamezno vrsto betona sem pridobil iz standarda SIST EN 1992-1-1 (slika 8).

Lastnost	Trdnostni razredi betona													
$f_{ck}$ [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
$f_{cm}$ [MPa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
$f_{ctm}$ [MPa]	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5
$f_{ctk,0,05}$ [MPa]	1,1	1,3	1,5	1,8	2	2,2	2,5	2,7	2,9	3	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk,0,95}$ [MPa]	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
$E_{cm}$ [GPa]	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
$\varepsilon_{c1}$ [‰]	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
$\varepsilon_{cu1}$ [‰]	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
$\varepsilon_{c2}$ [‰]	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
$\varepsilon_{cu2}$ [‰]	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
$n$	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
$\varepsilon_{c3}$ [‰]	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
$\varepsilon_{cu3}$ [‰]	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

Slika 8: Trdnostne in deformacijske lastnosti betona normalne teže v odvisnosti od trdnostnega razreda  
(SIST EN 1992-1-1/A101:2005: 32 )

Na podlagi izbranih deformacij betona in armature ( $\varepsilon_1/\varepsilon_s$ ) sem s pomočjo enačbe (2) izračunal pripadajočo maksimalno vrednost koeficienta višine tlačene cone  $k_x$ . Izračunano vrednost sem uporabil še v enačbi (6) za izračun vrednosti  $k_{x2}$ , ki predstavlja vrednost izbrane koordinate  $\zeta$  pri mejni deformaciji betona  $\varepsilon_{c2}$ . Z dobljenima vrednostima sta določeni meji integracijskih območij, ki sem jih v nadaljnjem izračunu potreboval pri integriranju. Pri pregledu enačb za račun koeficientov  $k_d$  in  $k_z$  hitro ugotovimo, da gre za integralske enačbe z integracijsko spremenljivko  $\zeta$ . Integracijo sem izvedel numerično po slojih debeline  $d\Delta\zeta$ , ki zagotavlja zadostno natančnost rezultatov. Debelina upoštevanih slojev  $d\Delta\zeta$  je morala biti za zagotovitev ustrezne natančnosti rezultatov dovolj majhna. Pri numeričnem računu integracije po slojih sem celotno višino tlačne cone  $x=k_x \cdot d$  razdelil na  $0,0001 \cdot k_x \cdot d$  debele sloje oziroma na  $n=k_x/0,0001$  slojev. Numerični izračun je potekal po istem zaporedju kot pri izpeljavi teoretičnih podlag.

Z opisanim numeričnim izračunom sem na podlagi ene kombinacije izbrane deformacije betona  $\varepsilon_1$  in deformacije armature  $\varepsilon_s$  na podlagi izbranega trdnostnega razreda betona določil pripadajoče vrednosti treh računanih koeficientov. Izračune sem izvajal v ločenih datotekah na podlagi trdnostnega razreda betona zaradi velike količine podatkov, ki so upočasnjevali sprotno shranjevanje opravljenih izračunov. Primer izračuna za eno kombinacijo deformacij prikazujejo preglednica 1, preglednica 2 in preglednica 3.

Preglednica 1: Začetni del numeričnega izračuna koeficientov  $k_x$ ,  $k_z/k_s$  in  $k_d$

C55/					
				‰	
fck	55	Mpa	$\varepsilon_{c1}$	2,5	0,002
fck,cu	67	Mpa	$\varepsilon_{cu1}$	3,2	0,003
fcm	63	Mpa	$\varepsilon_{c2}$	2,2	0,002
fctm	4,21	Mpa	$\varepsilon_{cu2}$	3,1	0,003
Ecm	38	Gpa	$\varepsilon_{c3}$	1,8	0,001
			$\varepsilon_{cu3}$	3,1	0,003
			n	1,75	1,75
			$\varepsilon_s$	3	0,003

$\varepsilon_1 = \varepsilon_{cu}$	$\varepsilon_s$	$k_x$	$k_x$
3,1	3	0,50	0,3

0 < $\eta$ <	$k_{si} \leq k$	$k_d$	do	SUM	$k_z$
0	0	0	0	0	0,80
0,0001	2,3866	2,386	4,851	4,851	
0,0002	4,7736	7,160	9,702	1,455	
0,0003	7,1612	1,432	1,455	2,910	$k_s$
0,0004	9,5492	2,387	1,940	4,850	1,24
0,0005	1,1937	3,580	2,424	7,275	
0,0006	1,4326	5,013	2,909	1,018	$k_x$
0,0007	1,6716	6,685	3,394	1,357	0,50
0,0008	1,9106	8,595	3,878	1,745	
0,0009	2,1496	1,074	4,362	2,182	$k_d$
0,001	2,3887	1,313	4,847	2,666	0,30
0,0011	2,6278	1,576	5,331	3,199	
0,0012	2,8670	1,862	5,815	3,781	
0,0013	3,1062	2,173	6,299	4,411	
0,0014	3,3455	2,508	6,783	5,089	

Preglednica 2: Vmesni del numeričnega izračuna pri vrednosti  $\zeta = k_{x2}$  (vrednosti sovpadajo)

0,3605	8,5230		0,165	9,999		0,229
0,3606	8,5240		0,165	1E-		0,229
0,36065	4,7514	4,7514	0,165	5,573	5,573	0,229
0,3607		3,7733	0,165		4,426	0,229
0,3608		8,5260	0,165		1E-	0,229
0,3609		8,5270	0,165		1E-	0,229

Preglednica 3: Končni del numeričnega izračuna pri vrednosti  $\zeta = k_x$

0,5079		9,9970	0,301	1E-	0,376
0,508		9,9980	0,301	1E-	0,376
0,5081		9,9990	0,301	1E-	0,377
0,50819		9,6721	0,302	9,672	0,377

Po končanem numeričnem izračunu za vse izbrane kombinacije deformacij betona in armature z upoštevanjem vrste visoko-trdnega betona, sem vse koeficiente zbral v tabelah, ki jih prikazuje priloga A. Pri dimenzioniranju in projektiranju konstrukcij pa je zastavljen cilj navadno čim večji izkoristek uporabljenih materialov, vendar ne za ceno varnosti. Vsak izmed uporabljenih materialov ima določene mejne vrednosti deformacij, ki jih še lahko prenese. Iz opravljenih numeričnih izračunov sem v posebni tabeli zbral samo koeficiente, ki pripadajo mejnim vrednostim deformacij posamezne vrste visoko-trdnega betona pri izbranih deformacijah armature. Ker se pri dimenzioniranju soočamo z mejnim stanjem nosilnosti konstrukcije, pripravljeni koeficienti iz preglednice 4 predstavljajo ustrezen pripomoček za želen izračun.

Preglednica 4: Vrednosti koeficientov  $k_x$ ,  $k_s$  in  $k_d$  za mejne vrednosti deformacij posamezne vrste visoko trdnega betona.

ARMATURA			BETON				
			C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105
S500			ε1=εcu2[‰]				
σs [kN/cm2]	εs[‰]		3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
43,48	2,17391	kx	0,588	0,572	0,554	0,545	0,545
		ks	1,299	1,275	1,251	1,239	1,238
		kd	0,336	0,312	0,282	0,263	0,257
43,48	3	kx	0,508	0,492	0,474	0,464	0,464
		ks	1,249	1,228	1,207	1,197	1,196
		kd	0,302	0,278	0,250	0,232	0,227
43,48	4	kx	0,437	0,420	0,403	0,394	0,394
		ks	1,206	1,188	1,171	1,162	1,161
		kd	0,269	0,246	0,219	0,203	0,198
43,48	5	kx	0,383	0,367	0,351	0,342	0,342
		ks	1,176	1,161	1,145	1,138	1,137
		kd	0,241	0,220	0,195	0,180	0,176
43,48	6	kx	0,341	0,326	0,310	0,302	0,302
		ks	1,154	1,140	1,127	1,120	1,119
		kd	0,219	0,199	0,176	0,162	0,158
43,48	7	kx	0,307	0,293	0,278	0,271	0,271
		ks	1,137	1,124	1,112	1,106	1,106
		kd	0,200	0,181	0,160	0,147	0,143
43,48	8	kx	0,279	0,266	0,252	0,245	0,245
		ks	1,123	1,112	1,100	1,095	1,095
		kd	0,185	0,166	0,146	0,134	0,131
43,48	9	kx	0,256	0,244	0,231	0,224	0,224
		ks	1,112	1,101	1,091	1,086	1,086
		kd	0,171	0,154	0,135	0,124	0,120
43,48	10	kx	0,237	0,225	0,213	0,206	0,206
		ks	1,102	1,093	1,083	1,079	1,079
		kd	0,159	0,143	0,125	0,115	0,112

### **3.2 Izdelava računalniškega programa za dimenzioniranja armiranobetonskih prerezov**

Pred izdelavo programa sem potek izvedbe podrobno načrtoval. Uporabil sem predhodno izračunane tabele, katerih izračun sem opisal v poglavju 3.1. Numeričen izračun koeficientov sem ločil po datotekah glede na izbrano vrsto betona, v lastni datoteki pa sem pripravil tudi program za dimenzioniranje. V posamezne zavihke programskega orodja Excel sem vse izračunane koeficiente za posamezno vrsto betona, ki so temeljili na vrednostih izbranih deformacij betona in armature, kopiral kot vrednosti, saj bi v primeru celotnega izračuna v eni datoteki to zelo upočasnilo upravljanje s končno datoteko.

#### **3.2.1 Vnos podatkov**

Najprej sem v glavnem zavihku, v katerem sem predvidel celoten izračun, naredil spustni meni, ki uporabniku omogoča izbiro ene izmed petih vrst betonov visoke trdnosti, ki jo želi uporabiti pri izvedbi izračuna. Podobno bi lahko storil tudi za različne vrste armature, vendar sem na podlagi krajšega razmisleka ter posvetovanja z mentorjem v diplomski nalogi uporabil le vrsto jekla S500. Zaradi uporabe betonov izključno visoke trdnosti, bi bilo v takšen betonski prerez nesmiselno nameščati armaturo slabše kvalitete, saj pri izbiri različnih materialov pri dimenzioniranju vedno težimo k optimalnemu razmerju med kvalitetami posameznih materialov, ekstremom pa se izogibamo. Poleg izbire vrste visoko-trdnega betona uporabnik poljubno izbere tudi deformacijo natezne armature, višino in širino predvidenega pravokotnega betonskega prereza ter oddaljenosti težišč natezne oziroma tlačne armature (če je ta potrebna) od nateznega oziroma tlačnega roba betonskega prereza ( $a, a'$ ). Na koncu uporabnik vnese še predvideno upogibno obremenitev v enoti [kNm], nadaljnji izračun pa izvede program sam. Predvidena polja za vnos omenjenih podatkov, ki so obarvana z oranžno, prikazuje slika 9.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
2									
3		VNESI PODATKE:				BETON:	C90/105		
4						ARMATURA:	C55/67 C60/75 C70/85 C80/95 C90/105		
5									
6		DIMENZIE BETONKEGA PREREZA							
7		širina			b	55	cm		
8		višina			h	90	cm		
9		oddaljenost težišča nat. armature do nateznega roba			a	6	cm		
10		oddaljenost težišča tl. armature do tlačenga roba			a'	6	cm		
11									
12									
13		UPOGIBNA OBREMENITEV			Med	6500	kNm		
14						650000	kNcm		
15									
16		IZBERI DEFORMACIJO ARMATURE:			εs	6	[‰]		
17									
18									
19									
20									
21		PODATKI:			C90/105				
22		fck [Mpa]			90				
23		fck,cube [Mpa]			105				
24		fck [kN/cm <sup>2</sup> ]			9				
25		fck,cube [kN/cm <sup>2</sup> ]			10,5				
26		fcd [kN/cm <sup>2</sup> ]			6				
27		εc1			2,8	‰			
28		εcu1			2,8	‰			
29		εc2			2,6	‰			
30		εcu2			2,6	‰			
31		εc3			2,3	‰			
32		εcu3			2,6	‰			
33		n			1,4				
34									
35		S500							
36		fyk			500	Mpa			
37					50	kN/cm <sup>2</sup>			
38		fyd			434,78	Mpa			
39					43,48	kN/cm <sup>2</sup>			
40		Es			200000	MPa			
41		εyd[‰]			2,17	[‰]			

Programček   podatki   Tabela koeficientov mejnih   C55-67   C60-75   C70-85   C80-95

Slika 9: Prikaz polj za vhodne podatke uporabnika

### 3.2.2 Izračun

#### 3.2.2.1 Dimenzioniranje potrebne armature znanega betonskega prereza

Prvi korak izračuna je predstavljal določitev potrebne vrednosti koeficienta  $k_d$  iz enačbe (27), na podlagi vnesenih vhodnih podatkov uporabnika. Iz vseh pripravljenih pripomočkov v obliki tabel program z upoštevanjem izbrane vrste betona poišče naslednjo, prvo višjo vrednost v tabeli koeficientov in odčita pripadajoče vrednosti deformacije betona in armature. Za ustreznost podanih dimenzij prereza morajo biti odčitane vrednosti deformacij betona in armature manjše od mejnih. Izbrane deformacije, ki jih program vrne uporabniku, sicer ustrezajo deformacijskemu stanju materialov zaradi upogibne obremenitve prereza, vendar v nadaljnjem izračunu te vrednosti nimajo posebnega pomena.

Zahtevani pogoj duktilnosti prereza določa minimalno vrednost deformacije armature, ki mora biti večja ali enaka deformaciji na meji elastičnosti  $\varepsilon_{yd}$ , saj s plastifikacijo armature pred izčrpanjem tlačne cone betona preprečimo krhko porušitev prereza. Kot priporočilo standard SIST EN 1992-1-1 navaja, da pri dimenzioniranju po možnosti upoštevamo še strožji pogoj od minimalne plastifikacije armature in z omejitvijo koeficienta višine tlačene cone  $k_x < 0,35$  pri betonih visokih trdnosti zagotovimo nižjo stopnjo armiranja in večjo duktilnost armiranobetonskega prereza. Pri izdelavi programa sem upošteval strožji pogoj glede omejitve koeficienta  $k_x$  in izračunal pripadajočo minimalno deformacijo armature pri mejni deformaciji betona  $\varepsilon_{cu2}$ . Na podlagi izračunanih vrednosti sem za vsako vrsto betona določil minimalno vrednost deformacije armature, vendar ne manj od 6‰ pri betonih trdnostnih razredov C55/67, C60/75, C70/85 ter ne manj od 5‰ pri trdnostnih razredih C80/95 in C90/105.

Na podlagi omenjene omejitve koeficienta  $k_x$  program na podoben način kot prej iz ustreznih pripadajočih deformacij betona in armature iz tabele koeficientov izbere največjo dopustno vrednost koeficienta  $k_d$ . S pomočjo enačbe (27) program nato izračuna velikost upogibnega momenta, ki ga je sposoben prevzeti enojno armiran prerez. Če je vrednost izračunanega upogibnega momenta večja od celotne zunanje obremenitve, potem je v izbranem prerezu potrebna le natezna armatura. V tem primeru program nadaljuje izračun na podlagi izpeljanih izrazov iz poglavja 2.2 in določi količino potrebne natezne armature glede na izbrane dimenzije prereza. V poljih, predvidenih za izračun dvojno armiranih prerezov, se izpišejo ustrezne vrednosti 0 oziroma /. V primeru, ko velikost podane upogibne obremenitve presega velikost upogibnega momenta, ki ga lahko prevzame enojno armiran prerez danih dimenzij, je potrebno povečati dimenzije betonskega prereza, namestiti tlačno armaturo ali zmanjšati deformacijo natezne armature. Pri izdelavi programa sem uporabil možnost namestitve tlačne armature. V primeru, da vrednost skupne upogibne obremenitve presega vrednost upogibnega momenta, ki ga lahko prevzamemo le z natezno armaturo, program po enačbi (41) izračuna skupni potreben prerez natezne armature  $A_s$ .  $[A_s]$  določa maksimalen prerez



natezne armature, ki jo lahko vsebuje enojno armiran prerez, da preprečimo krhko porušitev prereza zaradi odpovedi tlačne cone betona,  $\Delta A_s$  pa določa prerez dodatne natezne armature, ki prevzame preostanek vrednosti upogibnega momenta. V nadaljevanju najprej po enačbah (43) in (44) izračuna deformacije na mestu tlačne armature ter pripadajoče napetosti tlačne armature, na podlagi dobljenih vrednosti pa po enačbi (40) še potrebno količino tlačne armature. Program upošteva zahtevo, da naj količina tlačne armature ne preseže količine natezne armature. V programu je upoštevana tudi omejitev, da skupna količina vzdolžne armature ne preseže 8% bruto betonskega prereza.

Glede na vse zahtevane pogoje program določi potrebno količino natezne in tlačne armature (če je ta potrebna) ter v določeni celici definira ustreznost oziroma neustreznost začetnih dimenzij betonskega prereza. V primeru, da lahko celotno obremenitev prevzame enojno armiran prerez, program potrdi ustreznost začetnih dimenzij. Kadar je potrebna tudi tlačna armatura, program potrdi ustreznost dimenzij z dodatnim opozorilom, da potrebujemo dvojno armaturo, ki jo tudi izračuna. V vseh ostalih primerih v celici izpiše vzrok neustreznosti prereza. Kadar vrednost izračunanega koeficienta  $k_d$  presega največjo dopustno vrednost koeficienta  $k_d$  pri izbranih dimenzijah prereza, program najprej preveri ali je možna izvedba z dvojno armaturo, sicer pa obvesti uporabnika, da so že začetne dimenzije prereza glede na podano velikost upogibne obremenitve neustrezne. Kadar bi prerez sicer ustrezal z namestitvijo tlačne armature, vendar pa je presežena dovoljena stopnja armiranja, program opozori na nevarnost krhke porušitve prereza. Vsi načini opozarjanja uporabnika so razvidni iz slike 10.

USTREZNOST DIMENZIJ ARMIRANOBETONSKEGA PREREZA:	DIMENZIJE PREREZA SO USTREZNE! PREREZ PREVZAME OBREMENITEV Z ENOJNO ARMATURO!
USTREZNOST DIMENZIJ ARMIRANOBETONSKEGA PREREZA:	DIMENZIJE PREREZA SO USTREZNE, VENDAR JE POTREBNA DVOJNA ARMATURA!
USTREZNOST DIMENZIJ ARMIRANOBETONSKEGA PREREZA:	NE USTREZA! POVEČAJ ZAČETNE DIMENZIJE ARMIRANOBETONSKEGA PREREZA, SAJ JE KOLIČINA POTREBNE NATEZNE ARMATURE PREVELIKA!
USTREZNOST DIMENZIJ ARMIRANOBETONSKEGA PREREZA:	NE USTREZA! NEVARNOST KRHKE PORUŠITVE PREREZA ZARADI PREVELIKE STOPNJE ARMIRANJA!

Slika 10: Vrste opozoril, ki jih program vrne uporabniku na podlagi vhodnih podatkov



S podajanjem povratnih opozoril uporabniku, program uporabnika vodi in usmerja. S spreminjanjem začetnih izbranih dimenzij uporabnik s poskušanjem pride do optimalnega razmerja  $b/h$  ter količine potrebne natezne oziroma natezne in tlačne armature. Kadar je povratna informacija programa glede ustreznosti prereza obarvana zeleno, so začetne dimenzije prereza ustrezne, v nasprotnem primeru pa je obarvana rdeče. Primer rezultatov izračuna s poljubno izbrano vrsto betona ter začetnimi dimenzijami je prikazan na sliki 11:

REZULTATI:				
statična višina	d	84	cm	
razmerje $\delta = e/d$	$\delta$	0,071428571		
$k_d$ , potrebni		0,301		[ $k_d$ ] 0,112
$k_d$ , dani		DVOJNA ARMATURA!!!		
deformacija betona $\epsilon_1$ [%]		2,6	%	[ $\epsilon_1$ ] 1,079
deformacija armature $\epsilon_s$ [%]		10	%	[ $\epsilon_s$ ] 0,206
Omejitev prevelike stopnje armiranja: $k_x < 0,35$				$k_d$ , dej /
$\epsilon_s$ [%]	>	4,829		$k_x$ , dej /
				$k_s$ , dej /
Izbrana deformacija armature	10	[%]		
Pripadajoča deformacija betona		MEJNA DEFORMACIJA BETONA PRESEŽENA!		/
Moment, ki ga lahko prevzamemo s spodnjo armaturo:				
[Med]	2670,12	kNm		
Moment, ki ga mora prevzeti zgornja armatura:				
$\Delta$ Med	4329,88	kNm		
USTREZNOST DIMENZIJE ARMIRANOBETONSKEGA PREREZA:	NE USTREJA! POVEČAJ ZAČETNE DIMENZIJE ARMIRANOBETONSKEGA PREREZA, SAJ JE KOLIČINA POTREBNE NATEZNE ARMATURE PREVELIKA!			
Potrebna natezna armatura	[As]	78,85	cm <sup>2</sup>	POTREBNA SPODNJA/NATEZNA ARMATURA
Potrebna dodatna natezna armatura	$\Delta$ As	127,68	cm <sup>2</sup>	
Potrebna skupna natezna armatura	SUM As	206,53	cm <sup>2</sup>	
Deformacija tlačne armature: $\epsilon_s'$	2,057	[%]		ZGORNJA/TLAČNA ARMATURA IN PRIPADAJOČE NAPETOSTI IN DEFORMACIJE
Napetost tlačne armature: $\sigma_s'$	41,14	kN/cm <sup>2</sup>		
Potrebna tlačna armatura	As'	134,92	cm <sup>2</sup>	
Dovoljena stopnja armiranja spodaj:	4,00	%		Površina AB prereza:
Dovoljena stopnja armiranja zgoraj:	<4,00	%		4950
Maksimalni odstotek armature:	8,00	%		cm <sup>2</sup>
Dovoljena količina natezne armature:	198,00	cm <sup>2</sup>		
SKUPNA količina natezne armature:	206,53	cm <sup>2</sup>		NI OK!
Dovoljena skupna količina armature:	396,00	cm <sup>2</sup>		
SKUPNA količina armature v prerezu:	341,45	cm <sup>2</sup>		OK!

Slika 11: Primer rezultatov izračuna potrebne armature za poljubne vhodne podatke uporabnika

### 3.2.2.2 Dimenzioniranje betonskega prereza in natezne armature

Zaradi predpostavke o čim večji izkoriščenosti materialov ter dovoljene poljubne izbire deformacij betona in armature, pri dimenzioniranju upoštevamo vrednosti koeficientov  $k_x$ ,  $k_s$  in  $k_d$  pri mejnih deformacijah izbranega betona visoke trdnosti iz Preglednice 2. Na podlagi mejnega stanja nosilnosti, program po obratnem postopku, kot je bil opisan v poglavju 3.2.2.1, določi tudi potrebne dimenzije enojno armiranega betonskega prereza glede na velikost podanega upogibnega momenta. Pri računanju program uporabi koeficiente  $k_x$ ,  $k_s$  in  $k_d$ , izbrane pri mejni deformaciji posameznega trdnostnega razreda betona in poljubni deformaciji natezne armature, ki je navzdol omejena z upoštevanjem vrednosti koeficienta višine tlačene cone  $k_x \leq 0,35$ . Program torej upošteva izbran trdnostni razred betona, ki ga je uporabnik izbral na začetku iz spustnega menija, in iz tabele mejnih koeficientov odčita mejno deformacijo betona  $\epsilon_{cu2}$  za izbran trdnostni razred ter najmanjšo izmed vrednosti deformacij armature, ki še zadosti pogoju  $k_x \leq 0,35$ . Pri omenjenem izračunu imamo na voljo dve enačbi za tri neznane količine, zato eno izmed iskanih količin poljubno izberemo, ostali dve pa enolično izračunamo. Iščemo potrebno širino in višino betonskega prereza ter prerez natezne armature ob predpostavki, da dimenzioniramo enojno armiran prerez. Z izdelavo programa sem uporabniku omogočil poljubno izbiro širine betonskega prereza, ki jo poda v ustrezno polje programa, označeno z oranžno barvo. Na podlagi izbrane širine betonskega prereza uporabnika, program najprej po enačbi (27) izračuna potrebno statično višino betonskega prereza  $d$ , iz dobljene vrednosti pa še skupno potrebno višino prereza tako, da statični višini prišteje še oddaljenost težišča natezne armature od nateznega roba prereza. Po enačbi (31) program določi potreben prerez vzdolžne natezne armature enojno armiranega prereza. Rezultate za poljubno izbran trdnostni razred betona ter poljubno izbrano širino betonskega prereza prikazuje slika 12.

Dimenzioniranje betonskega prereza in armature				BETON	$\epsilon_{cu2}$ [%]	$\epsilon_s$ [%]
širina betonskega prereza (PODAJ v obarvanem polju na desni)	b	1	m	C55/67	3,1	6
		100	cm			
statična višina prereza	d	432	cm	Med	1500	kNm
		4,32	m		150000	kNcm
minimalna potrebna višina prereza:	h	438	cm	kd	0,219	
		4,38	m		ks	
potreben prerez natezne vzdolžne armature	$A_{s,potr.}$	9,21	cm <sup>2</sup>		1,154	

Slika 12: Primer rezultatov izračuna dimenzij enojno armiranega betonskega prereza in prereza natezne armature za poljubne vhodne podatke uporabnika

## 4 ZAKLJUČEK

V okviru svoje diplomske naloge sem se osredotočil na dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov na enojni upogib. Na podlagi predpostavljene enojne upogibne obremenitve prečnega prereza sem v prvem delu diplomske naloge pripravil izpeljavo potrebnih matematičnih izrazov za račun pripomočkov za hitro praktično dimenzioniranje armiranobetonskih pravokotnih prečnih prerezov in izdelavo računalniškega programa za dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov iz betonov visoke trdnosti.

Poleg osnovnega in poglobljenega znanja betonskih konstrukcij za dobro razumevanje problema mi je v veliko pomoč bilo tudi uporabno znanje programiranja v programskem orodju Microsoft Excel. V integralni obliki podane izraze pri izračunu in izpeljavi teoretičnih podlag, ki jih ni lahko rešiti analitično, sem reševal z numerično integracijo. Z ustrezno izbiro dovolj tankih slojev sem prišel do ustrezno natančne rešitve. Zaradi različnih vrednosti mejnih deformacij betonov visoke trdnosti, sem te pripomočke, za razliko od betonov običajne trdnosti, moral pripraviti za vsak trdnostni razred betona posebej. Vse pripravljene teoretične podlage so služile kot podlaga za izdelavo programa za praktično dimenzioniranje armiranobetonskih prerezov iz betonov visoke trdnosti. Na podlagi vhodnih podatkov uporabnika program kot glavni rezultat preveri ustreznost oziroma neustreznost začetnih dimenzij prereza ter določi potrebno količino natezne in morebitne tlačne armature glede na predvideno upogibno obremenitev, izbrano vrsto betona in podane dimenzije betonskega prereza. S povečevanjem trdnostnega razreda betona se manjšajo potrebne dimenzije betonskega prereza. Z izdelavo omenjenega programa ter predhodno pripravo vseh potrebnih teoretičnih podlag in pripomočkov za hitro dimenzioniranje sem poglobil dosedanje splošno znanje s področja betonskih konstrukcij. Izdelane teoretične podlage v obliki tabel je težko najti v strokovni literaturi v slovenskem jeziku, v omejenem obsegu so na razpolago le v Priročniku za projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih. Hkrati sem pripravil tudi uporabno praktično orodje za lažje in hitrejše dimenzioniranje pravokotnih prečnih prerezov iz betonov visoke trdnosti na upogibno obremenitev.

## SUMMARY

The Graduation thesis focuses on the problem of design of reinforced concrete cross-sections. Firstly, a theoretical basis and other necessary tools for appropriate design of reinforced rectangular cross-sections, made of high-strength concrete, are being presented. Taking limit states method into consideration, cross-sections exposed to bending load only are being analyzed. Based on relevant literature and previously prepared theoretical basis, I had every tool needed for a successful practical design of rectangular reinforced cross-sections, made of high-strength concretes. The appropriate knowledge of concrete structures was necessary to better understand the practical problem. High-level programming skills turned out to be very useful when developing Microsoft Excel software tool. Since complex integral expressions used in equations are not simple to solve analytically, the correct result was calculated by using numerical integration method. By taking into consideration sufficiently small variable changes, I managed to obtain the correct solution. Due to different values of the highest deformations, that are allowed due to the chosen type of high-strength concrete, practical tool for every type of concrete is developed separately. All theoretical tools prepared served only as a solid basis when making a program for the practical design of reinforced concrete structures, using high-strength concretes. Based on the user input data, program calculates the adequacy or inadequacy of the initial cross-section dimensions and the required amount of tensile and, if needed, also compressive reinforcement. With higher class of concrete compressive strength chosen, the necessary dimensions of the cross-section are decreasing. During the program development, I have deepened my knowledge of concrete structures. Prepared practical tools for design of high-strength concrete cross-sections are almost not available in Slovenian language, except in limited range in one handbook (Priročnik za dimenzioniranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih). As a result, useful practical tool for quicker and easier design of rectangular cross sections, exposed to bending load, has been created.

## VIRI

Beg, D. (ur.), Pogačnik A. (ur.) 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: loč. pag.

Lopatič J. 2011. Betonske konstrukcije 1. Študijsko gradivo (UNI GR-B). Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 99 str.

National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA) 2000. CIP 33 – High strength concrete. Concrete in practice 33.

doi: <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/33p.pdf> (pridobljeno 20. 08. 2012)

Rogač, R., Saje F., Lozej M. 2005. Priročnik za dimenzioniranje armiranobetonskih konstrukcij po metodi mejnih stanj. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 361 str.

Treppo, B., Šelih, J. 2000. Optimizacija količine veznega materiala v betonih visoke trdnosti. Materials and Technologies 34,1-2: 107-112.

doi: <http://mit.imt.si/Revija/izvodi/mit0012/21treppo.pdf> (pridobljeno 20. 08. 2012)

Zaletel Š. 2007. Smotrnost uporabe betona visoke trdnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba Š. Zaletel): 119 str.

Standardi:

SIST EN 1992-1-1/A101:2006: Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – 1-1. Del: Splošna pravila in pravila za stavbe – Nacionalni dodatek. Brussels, European Committee for Standardisation.

»Ta stran je namenoma prazna«.

## **PRILOGE**

### **Priloga A: Praktični pripomočki za dimenzioniranje v obliki tabel za posamezno vrsto visokotrdnega betona**

- A.2 BETON C55/67
- A.3 BETON C60/75
- A.4 BETON C70/85
- A.5 BETON C80/95
- A.6 BETON C90/105

ARMATURA			BETON C55/67									
			$\epsilon_{c1}[\text{‰}]$									
S500												
$\sigma_s [\text{kN/cm}^2]$	$\epsilon_s [\text{‰}]$		1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,1
43,48	2,17	kx	0,315	0,365	0,408	0,446	0,479	0,509	0,535	0,558	0,580	0,588
		ks	1,122	1,146	1,168	1,189	1,210	1,230	1,251	1,272	1,291	1,299
		kd	0,099	0,135	0,171	0,206	0,238	0,266	0,291	0,311	0,329	0,336
43,48	3	kx	0,250	0,294	0,333	0,368	0,400	0,429	0,455	0,478	0,500	0,508
		ks	1,094	1,114	1,133	1,151	1,169	1,187	1,206	1,224	1,242	1,249
		kd	0,080	0,112	0,144	0,176	0,205	0,233	0,256	0,277	0,295	0,302
43,48	4	kx	0,200	0,238	0,273	0,304	0,333	0,360	0,385	0,407	0,429	0,437
		ks	1,074	1,090	1,106	1,122	1,137	1,153	1,169	1,185	1,200	1,206
		kd	0,065	0,093	0,121	0,149	0,176	0,201	0,224	0,244	0,262	0,269
43,48	5	kx	0,167	0,200	0,231	0,259	0,286	0,310	0,333	0,355	0,375	0,383
		ks	1,061	1,075	1,088	1,102	1,115	1,129	1,143	1,157	1,171	1,176
		kd	0,055	0,079	0,104	0,129	0,154	0,177	0,198	0,218	0,235	0,241
43,48	6	kx	0,143	0,172	0,200	0,226	0,250	0,273	0,294	0,314	0,333	0,341
		ks	1,052	1,064	1,076	1,088	1,099	1,112	1,124	1,137	1,149	1,154
		kd	0,048	0,069	0,091	0,114	0,137	0,158	0,178	0,196	0,213	0,219
43,48	7	kx	0,125	0,152	0,176	0,200	0,222	0,243	0,263	0,282	0,300	0,307
		ks	1,045	1,058	1,066	1,077	1,087	1,098	1,109	1,121	1,132	1,137
		kd	0,042	0,061	0,081	0,102	0,123	0,143	0,161	0,178	0,194	0,200
43,48	8	kx	0,111	0,135	0,158	0,179	0,200	0,220	0,238	0,256	0,273	0,279
		ks	1,040	1,052	1,059	1,068	1,078	1,088	1,098	1,110	1,119	1,123
		kd	0,038	0,054	0,073	0,092	0,111	0,130	0,147	0,162	0,179	0,185
43,48	9	kx	0,100	0,122	0,143	0,163	0,182	0,200	0,217	0,234	0,250	0,256
		ks	1,036	1,047	1,053	1,062	1,070	1,079	1,089	1,098	1,108	1,112
		kd	0,034	0,049	0,066	0,084	0,102	0,119	0,136	0,151	0,166	0,171
43,48	10	kx	0,091	0,111	0,130	0,149	0,167	0,184	0,200	0,216	0,231	0,237
		ks	1,032	1,043	1,048	1,056	1,064	1,072	1,081	1,090	1,099	1,102
		kd	0,031	0,045	0,061	0,077	0,094	0,110	0,126	0,140	0,154	0,159



ARMATURA			BETON C60/75								
			εc1[‰]								
S500			1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	2,9
σs [kN/cm2]	εs[‰]										
43,48	2,17	kx	0,315	0,365	0,408	0,446	0,479	0,509	0,535	0,558	0,572
		ks	1,121	1,144	1,165	1,186	1,205	1,224	1,243	1,263	1,275
		kd	0,089	0,123	0,157	0,191	0,223	0,252	0,278	0,300	0,312
43,48	3	kx	0,250	0,294	0,333	0,368	0,400	0,429	0,455	0,478	0,492
		ks	1,093	1,113	1,131	1,149	1,166	1,182	1,200	1,217	1,228
		kd	0,072	0,102	0,132	0,163	0,192	0,220	0,245	0,267	0,278
43,48	4	kx	0,200	0,238	0,273	0,304	0,333	0,360	0,385	0,407	0,420
		ks	1,073	1,089	1,105	1,120	1,134	1,149	1,164	1,179	1,188
		kd	0,059	0,084	0,111	0,138	0,165	0,190	0,214	0,234	0,246
43,48	5	kx	0,167	0,200	0,231	0,259	0,286	0,310	0,333	0,355	0,367
		ks	1,060	1,074	1,087	1,100	1,113	1,126	1,139	1,153	1,161
		kd	0,050	0,072	0,095	0,119	0,144	0,167	0,189	0,209	0,220
43,48	6	kx	0,143	0,172	0,200	0,226	0,250	0,273	0,294	0,314	0,326
		ks	1,051	1,063	1,075	1,086	1,097	1,109	1,121	1,133	1,140
		kd	0,043	0,062	0,083	0,105	0,128	0,149	0,170	0,188	0,199
43,48	7	kx	0,125	0,152	0,176	0,200	0,222	0,243	0,263	0,282	0,293
		ks	1,045	1,055	1,065	1,076	1,086	1,096	1,107	1,118	1,124
		kd	0,038	0,055	0,074	0,094	0,115	0,135	0,154	0,171	0,181
43,48	8	kx	0,111	0,135	0,158	0,179	0,200	0,220	0,238	0,256	0,266
		ks	1,040	1,049	1,058	1,067	1,076	1,086	1,095	1,105	1,112
		kd	0,034	0,050	0,067	0,085	0,104	0,123	0,140	0,157	0,166
43,48	9	kx	0,100	0,122	0,143	0,163	0,182	0,200	0,217	0,234	0,244
		ks	1,036	1,044	1,052	1,061	1,069	1,078	1,086	1,096	1,101
		kd	0,031	0,045	0,061	0,078	0,095	0,113	0,129	0,145	0,154
43,48	10	kx	0,091	0,111	0,130	0,149	0,167	0,184	0,200	0,216	0,225
		ks	1,032	1,040	1,047	1,055	1,063	1,071	1,079	1,087	1,093
		kd	0,028	0,041	0,056	0,072	0,088	0,104	0,120	0,135	0,143

ARMATURA			BETON C70/85							
S500			εc1[‰]							
σs [kN/cm2]	εs[‰]		1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,7
43,48	2,17	kx	0,315	0,365	0,408	0,446	0,479	0,509	0,535	0,554
		ks	1,120	1,142	1,163	1,183	1,201	1,218	1,236	1,251
		kd	0,079	0,110	0,143	0,175	0,206	0,236	0,263	0,282
43,48	3	kx	0,250	0,294	0,333	0,368	0,400	0,429	0,455	0,474
		ks	1,093	1,112	1,129	1,146	1,162	1,178	1,194	1,207
		kd	0,065	0,091	0,120	0,149	0,178	0,206	0,232	0,250
43,48	4	kx	0,200	0,238	0,273	0,304	0,333	0,360	0,385	0,403
		ks	1,073	1,088	1,103	1,118	1,132	1,145	1,159	1,171
		kd	0,053	0,076	0,100	0,126	0,152	0,178	0,202	0,219
43,48	5	kx	0,167	0,200	0,231	0,259	0,286	0,310	0,333	0,351
		ks	1,060	1,073	1,086	1,099	1,111	1,123	1,135	1,145
		kd	0,044	0,064	0,086	0,109	0,133	0,156	0,179	0,195
43,48	6	kx	0,143	0,172	0,200	0,226	0,250	0,273	0,294	0,310
		ks	1,051	1,063	1,074	1,085	1,096	1,106	1,117	1,127
		kd	0,038	0,056	0,076	0,096	0,118	0,139	0,160	0,176
43,48	7	kx	0,125	0,152	0,176	0,200	0,222	0,243	0,263	0,278
		ks	1,044	1,055	1,065	1,074	1,084	1,094	1,104	1,112
		kd	0,034	0,050	0,067	0,086	0,106	0,126	0,145	0,160
43,48	8	kx	0,111	0,135	0,158	0,179	0,200	0,220	0,238	0,252
		ks	1,039	1,048	1,057	1,066	1,075	1,084	1,093	1,100
		kd	0,030	0,045	0,061	0,078	0,096	0,114	0,133	0,146
43,48	9	kx	0,100	0,122	0,143	0,163	0,182	0,200	0,217	0,231
		ks	1,035	1,043	1,052	1,060	1,068	1,076	1,084	1,091
		kd	0,027	0,040	0,055	0,071	0,088	0,105	0,122	0,135
43,48	10	kx	0,091	0,111	0,130	0,149	0,167	0,184	0,200	0,213
		ks	1,032	1,039	1,047	1,054	1,062	1,069	1,077	1,083
		kd	0,025	0,037	0,051	0,065	0,081	0,097	0,113	0,125

ARMATURA			BETON C80/95							
			$\epsilon_{c1}[\text{‰}]$							
S500										
$\sigma_s [\text{kN/cm}^2]$	$\epsilon_s [\text{‰}]$		1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,6
43,48	2,17	kx	0,315	0,365	0,408	0,446	0,479	0,509	0,535	0,545
		ks	1,119	1,142	1,162	1,181	1,199	1,216	1,230	1,239
		kd	0,074	0,104	0,134	0,165	0,196	0,225	0,254	0,263
43,48	3	kx	0,250	0,294	0,333	0,368	0,400	0,429	0,455	0,464
		ks	1,092	1,111	1,129	1,145	1,161	1,176	1,189	1,197
		kd	0,060	0,086	0,113	0,141	0,169	0,196	0,223	0,232
43,48	4	kx	0,200	0,238	0,273	0,304	0,333	0,360	0,385	0,394
		ks	1,073	1,088	1,103	1,117	1,131	1,144	1,157	1,162
		kd	0,049	0,071	0,095	0,119	0,145	0,170	0,194	0,203
43,48	5	kx	0,167	0,200	0,231	0,259	0,286	0,310	0,333	0,342
		ks	1,060	1,073	1,086	1,098	1,110	1,122	1,133	1,138
		kd	0,042	0,061	0,081	0,103	0,126	0,149	0,172	0,180
43,48	6	kx	0,143	0,172	0,200	0,226	0,250	0,273	0,294	0,302
		ks	1,051	1,062	1,073	1,084	1,095	1,105	1,116	1,120
		kd	0,036	0,053	0,071	0,091	0,112	0,133	0,154	0,162
43,48	7	kx	0,125	0,152	0,176	0,200	0,222	0,243	0,263	0,271
		ks	1,044	1,054	1,064	1,074	1,083	1,093	1,102	1,106
		kd	0,032	0,047	0,063	0,082	0,101	0,120	0,139	0,147
43,48	8	kx	0,111	0,135	0,158	0,179	0,200	0,220	0,238	0,245
		ks	1,039	1,048	1,057	1,066	1,074	1,083	1,092	1,095
		kd	0,028	0,042	0,057	0,074	0,091	0,109	0,127	0,134
43,48	9	kx	0,100	0,122	0,143	0,163	0,182	0,200	0,217	0,224
		ks	1,035	1,043	1,051	1,059	1,067	1,075	1,083	1,086
		kd	0,026	0,038	0,052	0,067	0,084	0,100	0,117	0,124
43,48	10	kx	0,091	0,111	0,130	0,149	0,167	0,184	0,200	0,206
		ks	1,032	1,039	1,047	1,054	1,061	1,069	1,076	1,079
		kd	0,022	0,035	0,048	0,062	0,077	0,093	0,109	0,115

ARMATURA			BETON C90/105							
S500			εc1[‰]							
σs [kN/cm2]	εs[‰]		1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,6
43,48	2,17	kx	0,315	0,365	0,408	0,446	0,479	0,509	0,535	0,545
		ks	1,119	1,142	1,162	1,181	1,199	1,215	1,231	1,238
		kd	0,072	0,100	0,130	0,160	0,190	0,219	0,246	0,257
43,48	3	kx	0,250	0,294	0,333	0,368	0,400	0,429	0,455	0,464
		ks	1,092	1,111	1,128	1,145	1,160	1,175	1,190	1,196
		kd	0,058	0,083	0,109	0,136	0,164	0,191	0,217	0,227
43,48	4	kx	0,200	0,238	0,273	0,304	0,333	0,360	0,385	0,394
		ks	1,073	1,088	1,103	1,117	1,130	1,143	1,156	1,161
		kd	0,047	0,069	0,091	0,115	0,140	0,165	0,189	0,198
43,48	5	kx	0,167	0,200	0,231	0,259	0,286	0,310	0,333	0,342
		ks	1,060	1,073	1,086	1,098	1,110	1,121	1,133	1,137
		kd	0,040	0,058	0,079	0,100	0,122	0,145	0,167	0,176
43,48	6	kx	0,143	0,172	0,200	0,226	0,250	0,273	0,294	0,302
		ks	1,051	1,062	1,073	1,084	1,095	1,105	1,115	1,119
		kd	0,035	0,051	0,069	0,088	0,108	0,129	0,150	0,158
43,48	7	kx	0,125	0,152	0,176	0,200	0,222	0,243	0,263	0,271
		ks	1,043	1,054	1,064	1,074	1,083	1,093	1,102	1,106
		kd	0,031	0,045	0,061	0,079	0,097	0,116	0,135	0,143
43,48	8	kx	0,111	0,135	0,158	0,179	0,200	0,220	0,238	0,245
		ks	1,039	1,048	1,057	1,066	1,074	1,083	1,091	1,095
		kd	0,027	0,040	0,055	0,071	0,088	0,106	0,124	0,131
43,48	9	kx	0,100	0,122	0,143	0,163	0,182	0,200	0,217	0,224
		ks	1,035	1,043	1,051	1,059	1,067	1,075	1,083	1,086
		kd	0,025	0,037	0,050	0,065	0,081	0,097	0,114	0,120
43,48	10	kx	0,091	0,111	0,130	0,149	0,167	0,184	0,200	0,206
		ks	1,032	1,039	1,047	1,054	1,061	1,068	1,076	1,079
		kd	0,022	0,034	0,046	0,060	0,075	0,090	0,105	0,112